

В. Ф. Ренке

**ПЛЕНОЧНЫЕ
КОНДЕНСАТОРЫ
С ОРГАНИЧЕСКИМ
СИНТЕТИЧЕСКИМ
ДИЭЛЕКТРИКОМ**

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

В книге излагаются сведения о свойствах, конструкции и технологии электрических конденсаторов постоянной емкости нового типа с органическим синтетическим пленочным диэлектриком. Приводятся также данные о синтетических пленках, применяемых для производства конденсаторов этого типа.

Книга предназначена для инженеров-электриков и радиотехников, имеющих дело с изготовлением или с применением электрических конденсаторов. Она может быть также полезна студентам старших курсов электротехнических высших учебных заведений, специализирующимся в области электроизоляционной техники.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В своей книге «Электрические конденсаторы», вышедшей в 1959 г., автор не мог уделить достаточного внимания новому и весьма прогрессивному типу пленочных конденсаторов с диэлектриком из органических синтетических пленок. Кроме того, за время, истекшее с момента издания этой книги, в области пленочных конденсаторов произошел дальнейший прогресс. Поэтому можно полагать, что издание специальной книги по вопросу о пленочных конденсаторах является вполне своевременным.

В настоящее время термин «пленочный конденсатор» приобрел широкое распространение и относится не только к конденсаторам с органическим диэлектриком, но и с диэлектриком неорганическим, например к некоторым типам керамических и стеклянных конденсаторов.

В данной книге рассматриваются только конденсаторы намотанного типа с органическим синтетическим диэлектриком.

Синтетические органические материалы находят себе известное применение также и в производстве некоторых типов переменных и полупеременных (подстроечных) конденсаторов; однако оно невелико в сравнении с масштабами использования синтетических пленок в производстве намотанных конденсаторов. В этой книге рассматриваются только конденсаторы намотанного типа постоянной емкости.

Автор получит удовлетворение, если его труд хотя бы в небольшой степени будет способствовать дальнейшему развитию отечественного производства конденсаторов с диэлектриком из синтетических пленок, с успехом применяющихся в самых разнообразных отраслях современной электротехники и электроники.

Автор выражает признательность рецензенту Л. Н. Закгейму за ряд ценных замечаний и приносит благодарность проф. Д. М. Казарновскому за выполненный им труд по редактированию настоящей книги.

Все замечания и пожелания просьба направлять по адресу: Ленинград, Д 41, Марсово поле, 1, Л. О. Госэнергоиздата.

Автор

ОГЛАВЛЕНИЕ

	<i>Стр.</i>
Введение	7
<i>Глава первая. Конденсаторы с диэлектриком из неполярных пленок . . .</i>	<i>9</i>
§ 1. Общая характеристика неполярных пленок с точки зрения их использования в конденсаторостроении	—
§ 2. Полистирольная пленка — стирофлекс	12
§ 3. Технология изготовления и конструкция полистирольных конденсаторов	18
§ 4. Электрические свойства полистирольных конденсаторов . . .	35
А. Точность и стабильность емкости	—
Б. Величина угла потерь	41
В. Сопротивление изоляции и постоянная времени	46
Г. Коэффициент абсорбции	50
Д. Электрическая прочность и допускаемое рабочее напряжение	52
§ 5. Полистирольные конденсаторы с повышенным напряжением и с повышенной реактивной мощностью	58
§ 6. Проблема повышения нагревостойкости полистирольной пленки	64
§ 7. Полиэтиленовая пленка и ее применение в конденсаторостроении	68
§ 8. Пленка из политетрафторэтилена-фторопласта-4	76
§ 9. Конденсаторы с диэлектриком из пленки политетрафторэтилена (фторопластовые)	84
§ 10. Проблема получения неполярного или слабополярного диэлектрика с повышенной нагревостойкостью	94
а. Тефлон FEP	95
б. Метил-производные стирола	—
в. Поливинилкарбазол	97
г. Полипропилен	98
<i>Глава вторая. Конденсаторы с диэлектриком из полярных пленок</i>	<i>103</i>
§ 11. Общая характеристика полярных пленок с точки зрения их использования в конденсаторостроении	—
§ 12. Пленки из эфиров целлюлозы и их применение в конденсаторном производстве	105
§ 13. Некоторые типы полярных пленок, опробованные в конденсаторном производстве, но не нашедшие широкого применения	114
а. Лектрофильм	—
б. Полихлорвинил	117
в. Политрифтормоноклорэтилен	119
§ 14. Пленка из полиэтилентерефталата — новый конденсаторный диэлектрик	123
§ 15. Полиэтилентерефталатные конденсаторы	127
§ 16. Поликарбонатная пленка и первый опыт ее применения в конденсаторостроении	141

	<i>Стр.</i>
§ 17. Проблема повышения диэлектрической проницаемости полярных синтетических пленочных материалов	147
Глава третья. Конденсаторы с комбинированным диэлектриком	150
§ 18. Общие принципы применения комбинированных диэлектриков в конденсаторах намотанного типа	—
А. Последовательное включение компонентов	151
Б. Параллельное включение компонентов	154
§ 19. Комбинированные конденсаторы с диэлектриком из полярной синтетической пленки и конденсаторной бумаги	156
§ 20. Комбинированные конденсаторы с диэлектриком из неполярной синтетической пленки и конденсаторной бумаги	164
§ 21. Комбинированные конденсаторы с диэлектриком из двух различных синтетических пленок	171
Глава четвертая. Тонкопленочные конденсаторы	174
§ 22. Проблема снижения толщины органических диэлектриков, применяемых в конденсаторостроении	—
§ 23. Лакопленочные конденсаторы	179
§ 24. Металло-лаковые конденсаторы	184
§ 25. Металло-политетрафторэтиленовые конденсаторы	192
Литература	196

ВВЕДЕНИЕ

В современной технике большое значение приобретают синтетические материалы, изготавливаемые химической промышленностью из различных простых исходных продуктов, получаемых преимущественно из нефти, природного газа и каменного угля. Среди этих материалов наибольшее распространение находят в настоящее время высокомолекулярные вещества, отличающиеся весьма большими размерами молекул, содержащих тысячи, а часто десятки и сотни тысяч атомов. Молекулярный вес таких материалов достигает сотен тысяч и миллионов.

Большие размеры молекул высокомолекулярных веществ придают им особые свойства, ценные для техники, и прежде всего прочность и легкость их переработки. Высокомолекулярные вещества служат основой пластических масс для прессовки или литья под давлением всевозможных изделий и позволяют получать из них волокна высокой прочности, превосходящие по качеству волокна природных веществ, а также изготавливать тонкие и прочные пленки. Многие высокомолекулярные вещества обладают электроизоляционными свойствами.

В семилетнем плане развития народного хозяйства СССР вопросу развития производства высокомолекулярных материалов уделено большое внимание. Этот план предусматривает «ускоренное развитие химической промышленности и особенно производства искусственного и синтетического волокна, пластических масс и других материалов».

В Программе КПСС также уделяется большое внимание этому вопросу. «Одна из крупнейших задач, — указывается в Программе, — всемерное развитие химической промышленности, полное использование во всех отраслях народного хозяйства достижений современной химии, в огромной степени расширяющей возможности роста народного богатства, выпуска новых, более современных и дешевых средств производства и предметов народного потребления». В разделе о задачах партии в области науки особо отмечается необходимость широкого развития теоретических исследований, имеющих своей целью «создание высококачественных и дешевых искусственных и синтетических материалов для всех отраслей народного хозяйства».

В связи с этим создаются условия для быстрого расширения потребления высокомолекулярных синтетических материалов во всех отраслях народного хозяйства для самых разнообразных целей, в том числе и в качестве электрической изоляции, в частности в качестве диэлектрика в конденсаторах. Для конденсаторостроения наибольший интерес представляют высокомолекулярные вещества в пленочной форме.

В настоящее время применение синтетических пленок в конденсаторном производстве еще находится в начальной стадии развития, если не считать производства конденсаторов из полистирольной пленки, которое было начато уже в довоенный период, хотя и в небольших масштабах. В ближайшие годы, в связи с указанными выше перспективами быстрого развития химической промышленности, применение синтетических пленок в конденсаторостроении будет быстро расширяться.

В конденсаторостроении синтетические пленки часто рассматривают как заменители конденсаторной бумаги. Это мнение недостаточно обосновано. Можно полагать, что для многих видов конденсаторов бумага еще на долгие годы останется основным типом диэлектрика, как относительно дешевый и доступный материал с достаточно высокими электрическими свойствами. Вместе с тем, не вытесняя бумаги из конденсаторостроения, синтетические пленки будут дополнять этот диэлектрик в производстве конденсаторов намотанного типа в тех случаях, когда бумага уже не может удовлетворять новым требованиям техники.

В первую очередь синтетические неполярные пленки применяют для изготовления конденсаторов с малым углом потерь, очень высокой постоянной времени и повышенной стабильностью емкости. Пленки полярного типа, а также и некоторые неполярные пленки позволяют расширять температурные пределы работы конденсатора по сравнению с теми значениями, которые может обеспечить пропитанная бумага. Важным преимуществом ряда синтетических пленок является также возможность изготовления конденсаторов с весьма малой абсорбцией заряда, что имеет большое значение в ряде областей новой техники.

Существующие в настоящее время типы конденсаторов с диэлектриком из синтетических пленок можно разбить на следующие основные группы:

- а) пленочные конденсаторы из неполярных пленок;
- б) пленочные конденсаторы из полярных пленок;
- в) пленочные конденсаторы с комбинированным диэлектриком;
- г) тонкопленочные конденсаторы.

Дальнейшее изложение вопроса о конденсаторах с диэлектриком из синтетических пленок мы будем вести применительно к этой классификации, рассматривая свойства отдельных пленок параллельно с характеристиками конденсаторов, которые из них изготавливаются.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

КОНДЕНСАТОРЫ С ДИЭЛЕКТРИКОМ ИЗ НЕПОЛЯРНЫХ ПЛЕНОК

§ 1. Общая характеристика неполярных пленок с точки зрения их использования в конденсаторостроении

Основным преимуществом неполярных синтетических веществ, а следовательно, и изготовленных из них пленок является малое значение угла потерь. Конденсаторы из таких пленок имеют тангенс угла потерь на один порядок величины меньше, чем у бумажных конденсаторов, т. е. того же порядка, что и у первоклассных высокочастотных материалов типа слюды или специальной керамики. С точки зрения величины угла потерь конденсаторы из неполярных пленок могут рассматриваться как заменители слюдяных конденсаторов, особенно удобные при больших номинальных значениях емкости. Учитывая дефицитность и высокую стоимость конденсаторной слюды, такая замена весьма желательна во всех тех случаях, когда можно допускать некоторое ухудшение стабильности емкости в сравнении с доброкачественными слюдяными конденсаторами. Это ухудшение неизбежно при переходе от неорганического материала — слюды к органическому материалу — синтетической пленке как вследствие резкого возрастания температурного коэффициента расширения, так и вследствие снижения твердости. Оба эти фактора приводят к появлению необратимых механических деформаций диэлектрика пленочного конденсатора при колебаниях температуры, а следовательно, и к необратимым изменениям емкости. Температурный коэффициент емкости пленочных конденсаторов из неполярных пленок также увеличен в сравнении с лучшими образцами слюдяных конденсаторов. Следует отметить, что TK_{ϵ} неполярных пленок в принципе является отрицательной величиной в соответствии с электронно-деформационной природой поляризации неполярных синтетических веществ. Обычно отрицательное значение сохраняется и у готовых конденсаторов, хотя в ряде случаев снижение емкости конденсатора при нагревании относительно меньше, чем соответствующее снижение диэлектрической проницаемости пленки. Иногда даже может наблюдаться небольшое увеличение емкости с ростом температуры. Это может

быть вызвано механическими деформациями конденсаторной секции при ее нагревании, а также расширением обкладок.

Вместе с тем при тщательной технологии производства можно получать значения ТКЕ и стабильности емкости конденсаторов из неполярных пленок приближающимися по величине к тем значениям, которые имеют слюдяные конденсаторы среднего качества (группа В по ГОСТ или группа D по международным нормам). Поэтому некоторые типы конденсаторов с диэлектриком из неполярных пленок находят себе применение в достаточно ответственных случаях электроизмерительной техники в качестве конденсаторов с точным значением емкости.

Малое значение угла потерь конденсаторов рассматриваемого типа позволяет им выступать в качестве заменителей бумажных силовых конденсаторов с водяным охлаждением, применяемых в области средних частот (10^3 — 10^4 гц), в частности в электротермических установках. В этом случае переход от бумаги к синтетической пленке позволяет снизить перегрев конденсатора в том же отношении, в каком снижается угол потерь, т. е. примерно в 10 раз. При этом оказывается возможным отказаться от применения водяного охлаждения, что резко упрощает конструкцию конденсатора и иногда удешевляет его, даже если стоимость пленки оказывается несколько выше стоимости бумаги.

Неполярные пленки обычно обладают весьма высоким удельным объемным сопротивлением, в связи с чем изготавливаемые из них конденсаторы имеют очень высокие значения постоянной времени. Внедрение таких пленок в конденсаторостроение позволило получить специальные типы конденсаторов с постоянной времени, превышающей 10^6 ом·ф, в то время как для бумажных конденсаторов это значение редко превосходит 10^4 ом·ф, т. е. на два порядка величин ниже. Конденсаторы со столь высокими значениями постоянной времени, в частности, нашли себе применение в ряде типов счетно-решающих устройств.

Особым преимуществом конденсаторов с диэлектриком из неполярных пленок являются малые значения коэффициента абсорбции, часто лежащие ниже 0,1%. Это обеспечивает малые значения остаточного заряда и оказывается весьма полезным свойством конденсатора в ряде новых видов электронной аппаратуры. Следует, однако, иметь в виду, что при пропитке конденсаторов данного типа, когда между слоями пленки и между пленкой и обкладками из фольги появляется зазор, заполненный жидким диэлектриком, значения коэффициента абсорбции могут резко возрасти. При этом обычно заметно ухудшается также и постоянная времени. Увеличение коэффициента абсорбции объясняется в данном случае появлением междуслойной поляризации за счет наличия свободных ионов в жидкости, заполняющей зазор. Проводимость жидкости на участках по краям пленки у краев обкладок объясняет снижение сопротивления изоляции (постоянной времени).

Недостатком неполярных пленок, с точки зрения конденсаторостроения, является низкое значение их диэлектрической проницае-

мости, обычно лежащей в пределах 2—2,5. Это заметно ниже, чем для пропитанной бумаги, для которой можно получать, в зависимости от ее плотности и от типа пропиточной массы, $\epsilon=3,5 \div 10$. Поэтому при равных толщинах диэлектрика удельная емкость конденсатора из неполярной пленки в 2—4 раза меньше, чем у бумажного конденсатора. В ряде случаев нижний предел толщины пленки выше, чем минимальная толщина бумаги, а допускаемая рабочая напряженность — ниже; в этом случае удельный объем конденсатора из неполярной пленки возрастает не только за счет сниженного значения ϵ , но и за счет увеличения толщины диэлектрика. В итоге при равных значениях емкости и рабочего напряжения объем и габаритные размеры конденсатора из неполярной пленки обычно заметно увеличены в сравнении с бумажным конденсатором. Это является существенным недостатком конденсатора из неполярной пленки. Если же сравнивать такой конденсатор со слюдяным конденсатором аналогичных номинальных данных, то в большинстве случаев неполярная пленка позволяет получить несколько меньший удельный объем, чем слюда, несмотря на то, что для слюды $\epsilon=7$. Это объясняется тем, что в слюдяном конденсаторе, изготовляемом сборкой из отдельных пластинок слюды небольшого размера, влияние внешнего конструктивного оформления на объем конденсатора значительно сильнее, чем в более компактном намотанном пленочном конденсаторе.

В настоящее время конденсаторы из неполярных пленок нашли широкое применение в радиоприемниках и телевизорах, в различных видах электронной аппаратуры и в счетно-решающих устройствах. Они используются в электроизмерительной технике, а также, как уже отмечалось выше, начинают применяться в колебательных контурах электротермических устройств средней частоты.

В последнее время неполярные синтетические пленки начали использоваться в качестве диэлектрика в так называемых дозиметрических конденсаторах, предназначенных для обнаружения и измерения радиоактивного излучения.

В электрическом дозиметре, основанном на конденсаторном принципе, перед внесением его в пространство, где надо определить наличие излучения, производится заряд конденсатора до определенного напряжения; при наличии излучения проводимость воздуха в ионизационной камере, в которую введены электроды, соединенные с обкладками конденсатора, увеличивается, что вызывает снижение напряжения на конденсаторе за счет его разряда; по величине снижения напряжения можно судить об интенсивности излучения.

От дозиметрических конденсаторов требуется, чтобы они обладали минимальным возможным саморазрядом, т. е. имели бы максимальную возможную постоянную времени. Нужные для таких конденсаторов высокие значения этой характеристики (не менее $2-3 \cdot 10^6$ ом $\cdot$ ф при емкостях порядка 300—500 пф) удалось получить только за счет применения неполярных синтетических пленок с особо высоким удельным сопротивлением.

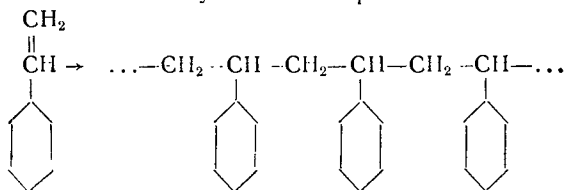
Основным типом неполярной пленки, используемой современным конденсаторостроением, является полистирольная пленка; некоторое распространение нашла также пленка из политетрафторэтилена, хотя ее использование в значительной степени ограничи-

вается ее высокой стоимостью; в меньшей степени применяется полиэтиленовая пленка; ставится вопрос о применении пленки из полипропилена.

§ 2. Полистирольная пленка — стирофлекс

Стирол $C_6H_5CH=CH_2$, иначе называемый винилбензол или фенолэтилен, представляет собой бесцветную жидкость со слабым запахом. Он имеет следующие физические свойства: температура кипения при давлении 760 торр¹ равна $145,2^\circ C$, температура замерзания — $30,6^\circ C$, коэффициент преломления при $20^\circ C$ равен 1,5469 и плотность при $20^\circ C$ равна 0,9060. Стирол нерастворим в воде, но растворяется в некоторых органических растворителях: бензине, четыреххлористом углероде и др. Стирол может быть получен различными методами, но в промышленных условиях его обычно производят из этилбензола $C_6H_5CH_2CH_3$, синтезируя последний из бензола и хлористого этила или из бензола и этилена.

Жидкий стирол — мономер находит себе известное применение в конденсаторостроении в качестве пропиточной массы для некоторых типов бумажных конденсаторов, изготовляемых зарубежными фирмами; однако основное применение имеет твердый продукт — полистирол, получаемый из исходного мономера путем его полимеризации при нагревании в присутствии инициаторов (обычно перекись бензоила); в процессе полимеризации происходит соединение молекул стирола по местам разрыва двойных связей и образуется длинная цепочечная молекула полистирола:



Длина получаемых молекул, характеризующаяся величиной молекулярного веса продукта полимеризации, зависит от температуры, при которой ведется этот процесс, и снижается при увеличении этой температуры. Если вести полимеризацию при $200^\circ C$, молекулярный вес ниже 100 000, при $100^\circ C$ — порядка 200 000, а при температуре полимеризации $50^\circ C$ можно довести молекулярный вес до 350 000 и выше. Средняя длина молекул зависит также от чистоты продукта, так как при наличии примесей их атомы могут присоединяться по месту свободных связей на концах молекулы полистирола и прекращать нарастание ее длины, обрывая полимеризацию. С ростом молекулярного веса увеличивается нагревостойкость полистирола, которую можно характеризовать температурой размягчения. Обычное значение, получаемое по методу Мартенса, составляет $70-80^\circ C$. Снижение температуры размягчения может иметь место при наличии в материале остатков мономера.

¹ 1 торр = 1 мм рт. ст.

Высокие электрические свойства полистирола были впервые открыты в СССР, в ЛФТИ АН СССР еще в начале 30-х годов этого столетия. Первые результаты работ по практическому применению этого материала в качестве высокочастотного диэлектрика, в частности и для изготовления конденсаторов, были опубликованы Н. П. Богородицким в 1934 г.

В течение ряда лет небольшие партии полистирольных конденсаторов малой емкости изготавливались некоторыми организациями из полистирольной пленки, полученной лаковым способом в лабораторных условиях.

Быстрое развитие производства полистирольных конденсаторов в конце 30-х годов началось в Германии, когда был разработан способ изготовления гибкой полистирольной пленки — «стирофлекс».

Для получения из полистирола тонкой гибкой пленки применяется метод выдавливания нагретого полистирола через щель с последующим вытягиванием ленты после выхода ее из мунштука.

Вытяжку ведут одновременно в двух направлениях, стремясь создать равномерное увеличение прочности ленты в обоих направлениях. Схема установки для вытяжки полистирольной пленки показана на рис. 1. Пленка полистирола, выдавленная из щели мунштука 1 при температуре $150\text{--}160^\circ\text{C}$, захватывается по краям зубчиками, расположенными на двух бесконечных транспортерах 2, обтекающих роликов 3; зубчики 4 тянут пленку, обеспечивая ее вытягивание в двух направлениях: продольном и поперечном; вытянутая пленка, называемая «ориентированной», наматывается на приемный барабан 5.

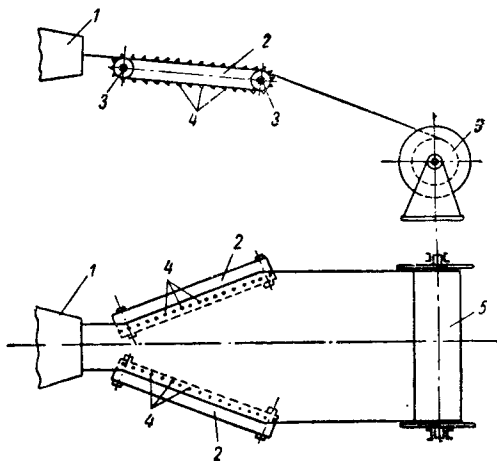


Рис. 1. Схема получения полистирольной пленки методом вытяжки.

Если получить пленку полистирола путем ее осаждения на гладкую поверхность из раствора, то такая неориентированная пленка будет иметь резко ухудшенные механические свойства по сравнению с ориентированной, как показано в табл. 1. Это объясняется тем, что в пленке, полученной отливом из раствора, длинные молекулы полистирола свернуты в клубки, и силы сцепления между ними ослаблены; при вытяжке горячей пленки молекулы распрямляются и ориентируются в направлении вытяжки, что улучшает прочность на разрыв, повышает удлинение и особенно резко увеличивает сопротивление перегибам. Этот принцип ориентации молекул путем вытяжки нагретого полимера применяется не только в производстве пленок, но и в производстве синтетического волокна, например, из капрона.

Таблица 1

Влияние вытяжки на механические свойства полистирольной пленки
(толщина 100 мк)

Тип пленки	Временное сопротивление разрыву, кг/см^2	Удлинение, %	Число двойных перегибов до разрушения
Неориентированная	250—280	1	1
Ориентированная (вытяжка 400%)	920—1000	5	1000—2000

При нагревании ориентированной пленки до температуры размягчения она стремится вернуться в исходное состояние, так как вытянутые молекулы снова сматываются в клубки. При этом длина пленки сокращается, а ширина несколько возрастает. На рис. 2 показана зависимость усадки по длине для образца ориентированной полистирольной пленки 20 мк от времени прогрева при различных температурах и от температуры при постоянном времени прогрева 1 ч. При испытании образец был свободно подвешен в термостате. В данном опыте при температуре 100°C длина образца пленки уменьшилась более чем в 2 раза.

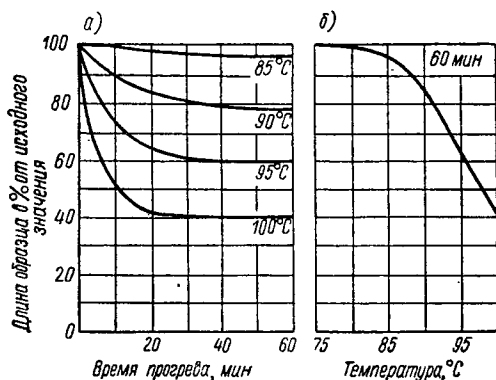


Рис. 2. Зависимость усадки образца полистирольной пленки по длине от времени прогрева при разных температурах (а) и от температуры (б) при постоянном времени прогрева.

Плотность пленки $1,04\text{--}1,05 \text{ г/см}^3$; временное сопротивление разрыву лежит в пределах $800\text{--}900 \text{ кг/см}^2$, а удлинение равно $2,8\text{--}3,2\%$; эти цифры показывают, что обычная степень вытяжки меньше, чем указано в табл. 1.

Электрические свойства полистирольной пленки мало зависят от частоты: для диапазона от 50 гц до 1 Мгц $\epsilon = 2,5\div 2,6$ и $\text{tg } \delta = 2\div 3 \cdot 10^{-4}$. Удельное объемное сопротивление пленки весьма высоко, до $10^{19}\text{--}10^{20} \text{ ом} \cdot \text{см}$ (все эти цифры относятся к комнатной температуре).

Гигроскопичность полистирола мала. По данным Н. А. Родионовой при выдержке образца при относительной влажности 98% в течение нескольких сотен часов можно получить прибыль в весе порядка 0,13%. Зависимость $\tan \delta$ от частоты для высушенного образца полистирола и для образца с содержанием влаги 0,13% показана на рис. 3; такое увлажнение может заметно повлиять на электрические свойства.

Частотная зависимость угла потерь полистирола может быть также вызвана его частичным окислением, как показали Хиппель и Вессон (рис. 4).

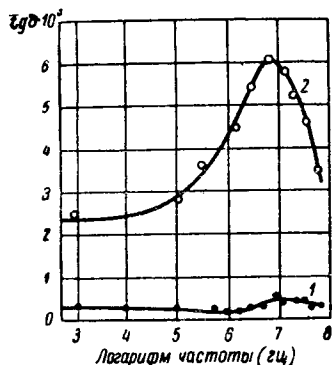


Рис. 3. Зависимость угла потерь от частоты (при 20°С) для двух образцов полистирола.

1 — высушенный; 2 — содержащий 0,13% влаги.

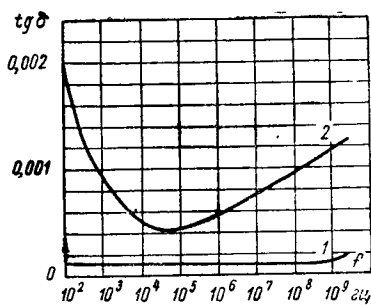


Рис. 4. Зависимость угла потерь двух образцов полистирола от частоты.

1 — изготовлен в вакууме; 2 — изготовлен на воздухе (окислен).

Электрическая прочность полистирольной пленки при ее испытании электродами с небольшой площадью оказывается весьма высокой, порядка нескольких сотен киловольт на 1 мм. Кривые разброса пробивных напряжений для пленки трех толщин при испытании в один и в два слоя с электродом диаметром 10 мм показаны в левой части рис. 5. В правой части этого же рисунка, сверху, показана зависимость пробивной напряженности от толщины пленки, при частоте 50 Гц, также в виде кривых разброса. Ниже приведены данные Катшера для зависимости наибольших значений кратковременной прочности при постоянном и переменном токе от толщины пленки и данные того же исследователя о зависимости электрической прочности от времени выдержки под напряжением: сравнивается область разброса для диэлектрика 2×30 мк с кривыми для максимальных значений диэлектрика 6×30 мк и для толстой пленки (150 мк), взятой в один слой. Кривые на рис. 5, г получены при постоянном токе. Они показывают, что при длительном действии напряжения пробивная напряженность для толстой пленки оказывается выше, чем для тонкой, хотя при кратковременных воздействиях максимальные значения для тонкой пленки

ложатся выше. Увеличение числа слоев улучшает длительную прочность, но даже при суммарной толщине, превышающей толщину толстой пленки (например: 6×30 и 1×150 мк), некоторое преимущество толстой пленки все же сохраняется.

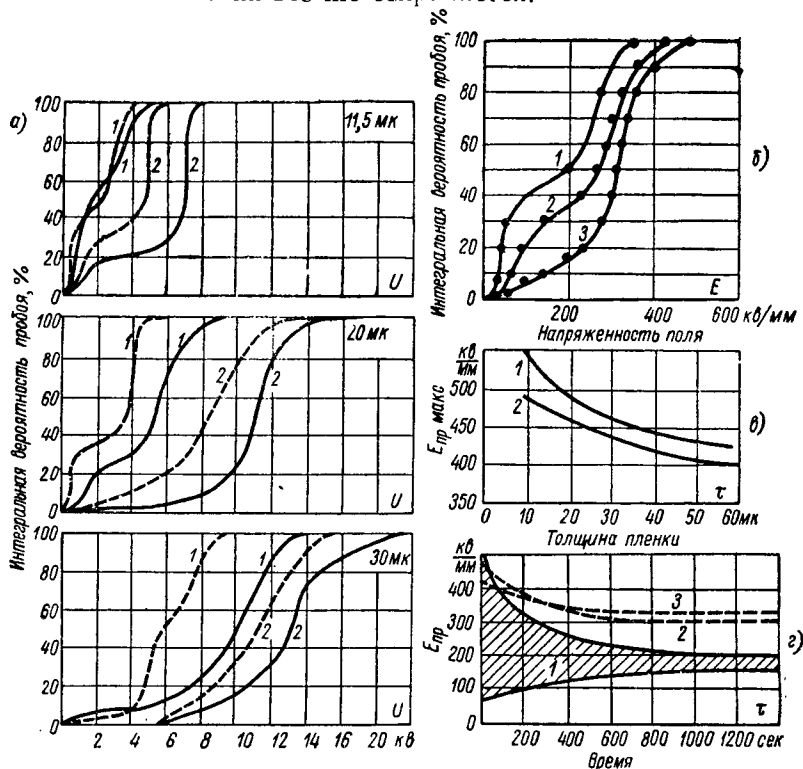


Рис. 5. Электрическая прочность ориентированной полистирольной пленки:

- а — разброс пробивного напряжения пленок толщиной 11,5; 20 и 30 мк (сплошные кривые — постоянный ток; пунктир — 50 гц);
 б — разброс пробивной напряженности при испытании в один слой (постоянный ток): 1—11,5 мк; 2—20 мк; 3—30 мк; в — зависимость ($E_{пр. макс}$) от толщины:
 1 — постоянный ток; 2 — частота 50 гц;
 г — зависимость пробивной напряженности (постоянный ток) от времени выдержки при разном числе слоев;
 1 — область разброса для образцов 2×30 мк; 2 и 3 — максимальные значения ($2-6 \times 30$ мк; 3— 1×150 мк).

Снижение электрической прочности полистирольной пленки с течением времени следует объяснять ее разрушением при воздействии ионизационных процессов, которые сказываются и на постоянном напряжении, хотя особо сильно проявляются при воздействии переменного напряжения.

По-видимому, основной причиной, вызывающей в данном случае снижение электрической прочности, является воздействие озона и окислов азота, выделяющихся при ионизации воздуха. На рис. 6 представлено, по данным А. П. Бутра, влияние времени воздействия озона, а также озона совместно с окислами азота, на угол потерь и механическую прочность полистирольной

пленки; параллельно с изменением этих характеристик происходит и снижение пробивной напряженности. Для пленки толщиной 20 мк, которая имела интегральную вероятность пробоя при напряженности 100 кв/мм, равную 6%, после выдержки в атмосфере озона в течение 400 ч было отмечено возрастание вероятности пробоя при той же напряженности поля до 50%.

Большой разброс значений электрической прочности полистирольной пленки, особенно при малых значениях ее толщины, следует объяснять наличием в ней слабых мест. Известно, например, что в конденсаторной бумаге слабыми местами являются проводящие включения в виде частиц угля и соединений железа и меди. При малых значениях толщины бумаги такие частицы могут пронизывать лист бумаги насквозь и легко обнаруживаются при пропускании бумаги между двумя проводящими валиками на специальной установке для определения содержания в бумаге токопроводящих частиц. Однако при испытании на такой установке полистирольной пленки малой толщины наличие проводящих частиц обычно не удается зарегистрировать даже при больших значениях обследованной площади пленки. Таким образом, надо прийти к выводу, что слабые места в полистирольной пленке имеют совсем иную природу, чем в конденсаторной бумаге.

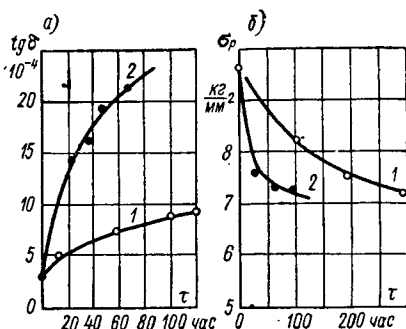


Рис. 6. Влияние выдержки в атмосфере озона (1) и в атмосфере озона и окислов азота (2) на величину угла потерь (а) и временного сопротивления разрыву (б) для полистирольной пленки.

Для исследования природы слабых мест в полистирольной пленке А. П. Бутра применил метод «водяных» электродов (фильтровальный картон, смоченный водопроводной водой с добавлением нескольких капель масляной кислоты), позволявший установить наличие участка с пониженным сопротивлением и далее обследовать его с помощью микроскопа. Точная локализация слабого места на обследуемом участке производилась методом цветных реакций. Этим путем удалось установить содержание в полистирольной пленке сквозных пор и инородных включений (сажа, асбест); при толщине пленки 20 мк количество их было невелико: 1—2 дефекта на площади $100 \times 10 \text{ см}^2$. В отдельных рулонах слабых мест оказывалось в 3—4 раза больше. Сквозных пор попадалось значительно больше, чем инородных включений, обладающих проводимостью. Размер этих дефектов был мал: их поперечник обычно не превышал 10—50 мк. Кроме того, в исследуемых пленках были обнаружены и иные дефекты структуры в виде небольших кусочков твердого полистирола, очевидно, не расплавившихся в процессе выработки пленки. Возможно, что такие кусочки попадают на горячую пленку в процессе ее вытяжки, пока она еще не остыла. В месте такого включения на пленке наблюдается местное утолщение до 40—60 мк. Рассмотрение такого включения под микроскопом в поляризованном свете показало присутствие в пленке механических напряжений вокруг места расположения включения. Натяжение пленки может вызвать ее разрыв около такого включения, что должно привести к резкому снижению электрической прочности.

Исследования Черча и Гартона показали, что причиной образования слабых мест в полистирольной пленке, приводящих к повы-

шенному браку по пробою готовых конденсаторов, могут служить частички перхоти, попавшие на ее поверхность.

Опасное влияние этих частичек обусловлено содержанием в них жиров и масел из человеческого тела. Жиры действуют, как растворитель, вызывая сначала локальную релаксацию молекулярной ориентации полистирола, а затем приводя к размягчению и разрыву пленки вокруг частицы (рис. 7). Такой же эффект может дать попадание на пленку человеческого волоса (рис. 8). Повидимому, эти дефекты проявляются особенно заметно, когда секции полистирольных конденсаторов подвергаются относительно сильному прогреву в процессе их «запекания» (см. ниже). С этой точки зрения опасными могут стать даже отпечатки жирных человеческих пальцев на пленке.

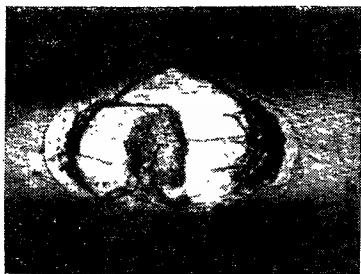


Рис. 7. Сквозное отверстие, образовавшееся в ориентированной полистирольной пленке в месте попадания частички перхоти (сильно увеличено).



Рис. 8. Разрушение полистирольной пленки в месте попадания на ее поверхность человеческого волоса.

Все перечисленные выше дефекты тем более опасны для пленки, чем меньше ее толщина. Можно полагать, что в пленках малых толщин особенно велика вероятность появления сквозных пор. Поэтому, как указывалось выше, современное конденсаторостроение не применяет полистирольных пленок тоньше 10—20 мк; при этих толщинах даже применение пленки в несколько слоев не дает возможности достичь тех значений средней электрической прочности, которые показывают более толстые пленки.

§ 3. Технология изготовления и конструкция полистирольных конденсаторов

Секции полистирольных конденсаторов, как и секции бумажных конденсаторов, изготавливаются намоткой на специальных станках лент из полистирольной пленки, сматываемых с рулонов, и лент из металлической фольги, или из металлизированной пленки. По своей конструкции эти намоточные станки подобны обычным станкам для намотки бумажных конденсаторов, однако в ряде случаев их снабжают защитными чехлами (рис. 9) (обычно из органического стекла) для того, чтобы исключить возможность попадания на поверхность пленки пыли и, особенно, частичек перхоти из окру-

жающего воздуха. Такие частички легко притягиваются к поверхности пленки, так как в связи с высоким поверхностным сопротивлением полистирола пленка наэлектризовывается в процессе намотки и долго держит полученный заряд.

Поверхностная электризация полистирольной пленки может вызывать другие неудобства. Создавая ионизацию воздуха у поверхности пленки, можно вызвать стекание с нее поверхностных зарядов, как показано на рис. 10.

Для устранения опасности загрязнения пленки в процессе намотки, кроме устранения статических зарядов с ее поверхности или применения защитных чехлов на станках, некоторые фирмы располагают намоточные станки в специально оборудованном помещении с кондиционированным воздухом и осуществляют мероприятия, затрудняющие образование пыли в этом помещении и ее проникновение извне.

Для намотки полистирольных конденсаторов малой емкости обычно применяют небольшие намоточные станочки с ручным приводом, причем между лентами полистирола закладывают заранее нарезанные отрезки лент фольги под заданную емкость; часто к ним уже заранее припаивают или приваривают выводные контакты. Было выдвинуто предложение¹ использовать плоскую оправку с осевым прорезом на намотки конденсаторов малой емкости с использованием рулонной фольги, что должно давать повышение

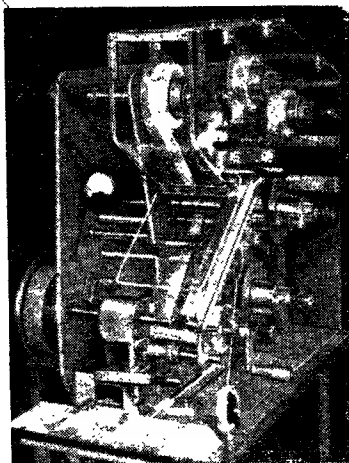


Рис. 9. Станок для намотки секций полистирольных конденсаторов с прозрачным защитным кожухом

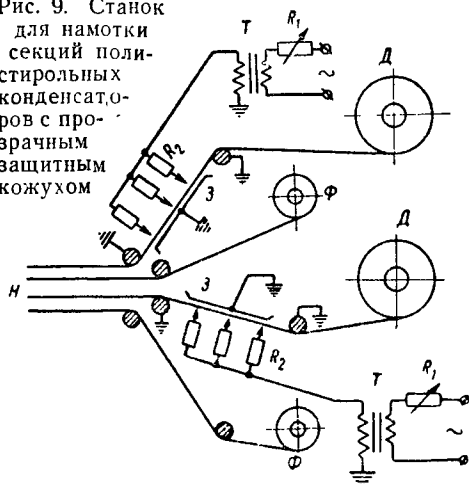


Рис. 10. Схема устройства для удаления статических зарядов с поверхности полистирольной пленки в процессе намотки.

Д — рулоны пленки; Ф — рулоны фольги; Т — трансформаторы на 10 кВ; R_1 — регулировочные реостаты в первичной цепи трансформаторов; R_2 — постоянные ограничительные сопротивления величиной по 1 Мом; З — заземленные пластинки; Н — намоточная оправка.

¹ Патент США, кл. 242-67, № 2968450, 17.01.1961 г., Д. Клемонс.

производительности. Схема намотки показана на рис. 11. Лента фольги сматывается с рулона Φ , проходит по направляющему лотку 2, пропускается через прорез в оправке O и накладывается на лоток 3, длина которого соответствует длине обкладки, обеспечивающей заданную емкость. Далее фольга обрывается в месте ее прохода через прорез. После этого с рулона D сматывается по лотку 1 лента диэлектрика (пленки), проводится через прорез оправки и накладывается на лоток 4. Затем оправка приводится во вращение, причем на нее наматы-

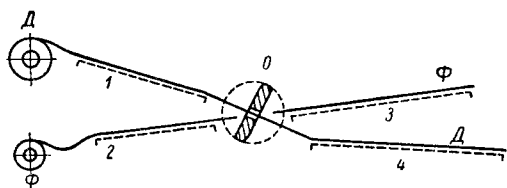


Рис. 11. Схема устройства станка с прорезной плоской намоточной оправкой по патенту Клемонса.

тываются два участка ленты диэлектрика с лотков 1 и 4 и два изолированные друг от друга отрезка фольги: с лотка 3 (заранее отрезанный) и с лотка 2 (смазывающийся с рулона). Получается плоская секция с двумя обкладками, изолированными лентой диэлектрика.

Некоторые фирмы для повышения стабильности емкости полистирольных конденсаторов, например при их использовании в фильтрах телефонной аппаратуры, производят намотку на металлические втулки, которые снимаются с намоточной оправки вместе с секцией. Применение таких втулок утяжеляет и удорожает конденсатор; было предложено вместо металлической втулки применять тонкий металлический сердечник с шероховатой поверхностью, который служил бы намоточной оправкой, а далее вынимался бы из головки намоточного станка вместе с секцией.¹ Был сделан также ряд предложений, в которых задача фиксации размеров внутреннего отверстия в секции, образующегося при ее снятии с оправки, решалась одновременно с улучшением надежности контактного узла. По одному патенту² было предложено вставлять в отверстие (после снятия секции с оправки) цилиндрические спирали, полученные свертыванием конца выводного проводника (рис. 12, а); выводы секции припаиваются к выводному проводнику. По другому патенту³ предлагается вставлять в отверстие металлические трубочки, развальцованные с одного конца; в трубку вставляется выводной проводник (рис. 12, б); впайвание его в трубку проводится одновременно с припайванием к краям трубки выступающих с торца краев обкладки (предусмотрена намотка с выступающей фольгой).

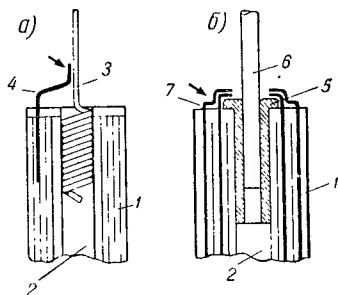


Рис. 12. Способы фиксации размеров внутреннего отверстия в секции полистирольных конденсаторов: а — с помощью проволоочной спирали; б — с помощью металлической трубки.

1 — конденсаторная секция; 2 — внутреннее отверстие секции; 3 — выводной проводник, конец которого свернут в спираль; 4 — вывод от одной из обкладок; 5 — металлическая трубка с развальцованным концом; 6 — выводной проводник; 7 — края обкладки, выступающие с торца секции; стрелки указывают места спайки.

¹ Патент ФРГ, кл. 21g, 10/02, (H01g), № 971395, 22.01.1959 г. Ф. Финк.

² Франц. патент. кл. H01g, № 1171905, 03.02.1959 г., А. Серф.

³ Франц. патент. кл. H01g, № 1125012, 23.10.1956 г., А. Пижонье.

Были выдвинуты также идеи отказа от применения металла для фиксирования размеров осевого отверстия секции. Например, предлагалось¹ наматывать секции на оправку весьма малого диаметра; при этом отверстии будет настолько мало, что исчезнет в процессе «запекания» секций. По другому патенту² предлагалось вставлять в отверстие круглый брусок из полистирола. Наконец было предложено³ опрессовывать намотанную секцию термопластичным полимером, например полиэтиленом, с таким расчетом, чтобы полимер сначала заполнил внутреннее отверстие в секции, а затем уже образовал на ее поверхности защитную оболочку.

При малых размерах полистирольных конденсаторов контактные выводы в виде кусочков тонкой фольги не могут быть использованы для крепления конденсатора при монтаже. Было предложено⁴ применять отрезок жесткого проводника Г-образной формы (рис. 13), выступ которого спаян с одним из выводов, а длинная часть плотно скреплена с конденсаторной секцией путем обертки наружными холостыми витками пленки. Выступающий за торец секции конец этого проводника может быть использован для крепления при монтаже.

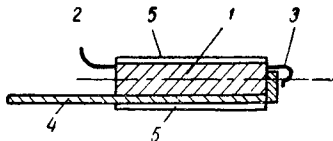


Рис. 13. Применение Г-образного проводника в качестве вывода и монтажного средства в производстве малогабаритных полистирольных конденсаторов.

1 — секция конденсатора; 2 — свободный выводной контакт; 3 — выводной контакт, припаянный к жесткому проводнику 4; 4 — холостые витки, притягивающие проводник к секции.

При намотке бумажных конденсаторов не имеет смысла вести контроль емкости в процессе намотки для получения малых отклонений емкости готового конденсатора от заданного номинала, поскольку бумага весьма гигроскопична и небольшие колебания относительной влажности в намоточном отделении вызывают резкие колебания емкости конденсаторных секций. Иначе обстоит дело в случае полистирольной пленки, гигроскопичность которой мала; кроме того, увеличенная стабильность емкости полистирольных конденсаторов во времени, в сравнении с бумажными конденсаторами, делает целесообразным значительное сужение допусков по емкости. В связи с этим намотку секций полистирольных конденсаторов обычно ведут с контролем емкости. Для этого необходимо, чтобы хотя один из рулонов фольги был изолирован от корпуса намоточного станка; при этом можно производить измерение емкости наматываемой секции в процессе намотки, присоединив измерительное устройство к обоим рулонам фольги.

В ряде случаев станок снабжается автоматическим устройством, которое останавливает вращение намоточной оправки, как только емкость секции достигнет заданного значения. Надо иметь в виду, что при операции «запекания» (см. ниже) емкость полистирольных намотанных секций несколько увеличивается. С учетом этого увеличения значение емкости, достигаемое при намотке, надо брать несколько ниже номинального значения емкости конденсатора.

¹ Патент ФРГ, кл. 21g, 10/02, (H01g), № 971829, 02.04.1959 г., Ф. Финк.

² Англ. патент, кл. 37, № 748900, 16.05.1956 г., Дж. Фарнсуорт.

³ Патент ФРГ, кл. 21g, 10/02, (H01g), № 964705, 28.05.1957 г., Г. Луц, К. Хантль.

⁴ Франц. патент, кл. H01g, № 1238321, 04.07.1960, Фирма Капа.

Величину этого «запаса» надо выбирать в соответствии с установленным режимом «запекания», причем надо учитывать и размеры секций.

При намотке секций полистирольных конденсаторов обычно используется алюминиевая фольга, такая же, как при намотке бумажных конденсаторов. Некоторые зарубежные фирмы применяют также свинцово-оловянную фольгу малой толщины. Такая фольга стоит дороже и увеличивает вес конденсатора, так как ее удельный вес значительно выше, чем алюминиевой. Некоторым преимуществом свинцово-оловянной фольги является легкость пайки, что выгодно при изготовлении конденсаторов с выступающей фольгой. Однако применение такого типа намотки, связанного с перерасходом

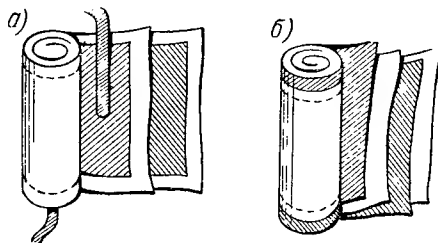


Рис. 14. Основные схемы намотки: а — с вкладными контактами (со скрытой фольгой); б — с выступающей фольгой.

фольги (рис. 14), оправдывается прежде всего в тех случаях, когда использование конденсаторов при повышенной нагрузке высокой частотой приводит к необходимости снизить потери в обкладках (см. ниже рис. 31). В этих же случаях повышенное удельное сопротивление свинцово-оловянной фольги оказывается нежелательным.

При изготовлении металлизированных полистирольных конденсаторов в качестве материала для обкладок применяется также цинк (с подслоем олова), преимуществом которого в данном случае является его низкая температура кипения, облегчающая и удешевляющая процесс металлизации полистирольной пленки методом испарения в вакууме. При изготовлении полистирольных конденсаторов интересным является предложение использовать в качестве материала для обкладок — графит, наносимый непосредственно на поверхность полистирольной пленки или применяемый в виде слоя, нанесенного с двух сторон на тонкую бумагу, служащую проводящей обкладкой.¹ Сообщается, что графитовые обкладки способствуют уменьшению влияния облучения на необратимое ухудшение постоянной времени полистирольного конденсатора. Это весьма важно при изготовлении дозиметрических конденсаторов (см. § 1). Указано, что при воздействии рентгеновского облучения (при дозе 7000—8000 рентген, в течение 5 ч) двух типов конденсаторов — с алюминиевыми и с графитовыми обкладками — в первом случае после облучения потеря заряда за 24 ч составила 30%, а во втором, при тех же условиях опыта, потеря заряда была менее 5%. Отмечено также, что алюминиевые обкладки в этом опыте были изготовлены из алюминия чистоты 96%; если применять алюминий, содержащий не более 0,05—0,1% примесей с атом-

¹ Франц. патент, кл. H01g, № 1201694, 4.01.1960 г., фирма Стеафикс.

ным весом, превышающим 24, то поведение конденсаторов при облучении резко улучшается.

Металлизация полистирольной пленки вполне возможна на том же оборудовании, которое используется для металлизации бумаги, но с некоторым изменением режимов в связи с тем, что нагревостойкость полистирола меньше, чем у бумаги. При этом появляется возможность резко ослабить влияние дефектов диэлектрика на электрическую прочность конденсаторов за счет явления «самовосстановления» при пробое (ток короткого замыкания вызывает оплавление и испарение тонкого слоя металла вокруг места пробоя, изолируя его от обкладок). Следует, впрочем, отметить, что в отличие от металлобумажных конденсаторов полистирольные металлизированные конденсаторы выдерживают меньшее число пробоев, сменяющихся самовосстановлением; после ряда таких пробоев обычно устанавливается короткое замыкание обкладок.

Другим преимуществом металлизации является удаление воздушного зазора между полистиролом и обкладкой; этот зазор образует последовательно включенную воздушную емкость, что снижает эффективное значение диэлектрической проницаемости иногда на 10—20%; кроме того, он ухудшает температурную стабильность емкости и ее постоянство во времени.

Очевидно, что для полного удаления воздушного зазора необходимо металлизировать полистирольную ленту с обеих сторон; такая лента в развернутом виде уже представляет собой готовый конденсатор с двумя обкладками, разделенными слоем диэлектрика.¹

Однако при намотке этой ленты, для ее превращения в обычную намотанную секцию, возникают затруднения. Действительно, уже на первом витке произойдет соприкосновение разноименных обкладок, т. е. короткое замыкание. Можно было бы использовать при этом, кроме двухсторонне металлизированной пленки, вторую, неметаллизированную пленку такой же толщины, удвоив емкость конденсатора, поскольку вторая пленка попадет в электрическое поле между разноименными обкладками первой пленки. Однако в этом случае соз-

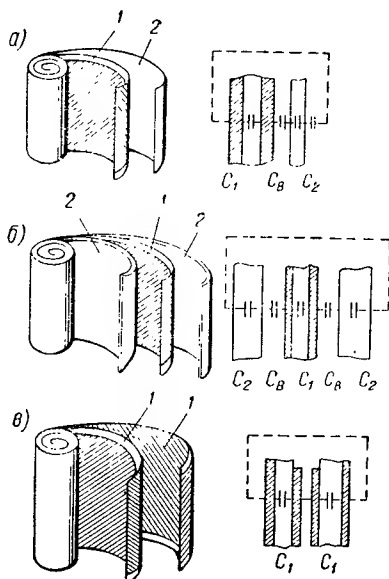


Рис. 15. Способы намотки металлизированных полистирольных конденсаторов при двухсторонней металлизации: а — добавочная лента той же толщины, что металлизированная; б — две добавочные ленты увеличенной толщины; в — две двухсторонне металлизированные ленты.

1 — металлизированная лента; 2 — неметаллизированная лента; C_B — емкость зазора, C_1 — емкость металлизированной ленты, C_2 — емкость неметаллизированной ленты.

¹ Авторское свидетельство СССР, № 103105, 26.07.1956, Л. Н. Закгейм, Б. С. Кулаков.

дается два воздушных зазора между второй пленкой и обкладками, т. е. ухудшается стабильность емкости конденсатора (рис. 15, а).

Для того чтобы преодолеть это неудобство, было предложено¹ наматывать вместе с двухсторонне металлизированной тонкой лентой полистирола две ленты увеличенной толщины, расположенные по обе стороны от металлизированной ленты и предупреждающие возможность короткого замыкания металлизированных обкладок при намотке. Эти ленты включаются при намотке в последовательном соединении между собой и с образующимися между ними и обкладками воздушными зазорами (рис. 15, б). Полученная при этом емкость будет резко снижена в сравнении с основной емкостью, созданной тонким металлизированным диэлектриком. Поэтому, с одной стороны, воздушные зазоры будут оказывать лишь малое влияние на емкость полученного этим методом конденсатора, а с другой стороны, емкость этого конденсатора можно получить близкой к заданному номиналу простым подбором длины металлизированной ленты. Неудобством этого предложения является резкое увеличение объема конденсатора, что не всегда допустимо.

Малые габариты при использовании одной двухсторонне металлизированной ленты можно получить, складывая ленту в виде «гармошки» (рис. 16); при этом опасность короткого замыкания обкладок устраняется. Имеются патенты на устройства для механизации процесса такого складывания лент, например патент Гаунта.²

Простым способом исключения опасности короткого замыкания обкладок при использовании двухсторонне металлизированных лент является намотка конденсатора из двух таких лент, сложенных одноименными обкладками, т. е. так, чтобы совпадали закраины, лишенные металла на соприкасающихся сторонах лент (рис. 15, в). На практике чаще применяют одностороннюю металлизацию, которая экономически более приемлема, чем двухсторонняя, хотя и дает некоторое ухудшение стабильности емкости.

Обкладки из фольги, еще широко применяющиеся в производстве полисти-

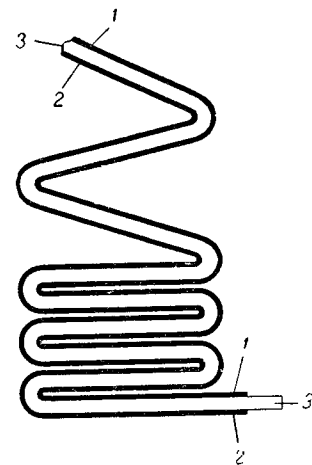


Рис. 16. Схема сборки металлизированного полистирольного конденсатора путем складывания в «гармошку».

1 — первая обкладка; 2 — вторая обкладка; 3 — диэлектрик.

рольных конденсаторов, связаны с нежелательными воздушными зазорами, о которых уже говорилось выше. Для ослабления влияния этих зазоров в производство полистирольных конденсаторов введена операция термической обработки («запекания»). При этом используется способность полистирольной ориентированной пленки сокращаться по длине при нагревании выше температуры, при которой делается возможной релаксация полимерных молекул и их возвращение из вытянутого состояния в клубкообразное (см. рис. 2).

Сокращение длины полистирольной ленты в намотанной секции приводит к сильному ее натяжению, сжатию витков секции и вытеснению воздуха из зазоров между диэлектриком и обкладками. Емкость секции при этом увеличивается на несколько процентов (рис. 17), а стабильность конденсатора во времени и при колеба-

¹ Англ. патент, кл. 37, 100/1, № 821418, 7.10.1959 г., Ч. Бэрчелл.

² Австралийск. патент, кл. 04.7, № 22218, 8.07.1959 г., Дж. Ч. Гаунт.

ниях температуры существенно улучшается, как показано на рис. 18 по данным Козенса.

Следует иметь в виду, что при наличии в секции внутреннего отверстия, о котором говорилось выше, в процессе термической обработки может произойти смещение части материала секции в объем, занятый этим отверстием. При этом сжатие витков может уменьшиться, и емкость конденсатора в процессе запекания не только не увеличится, но даже немного снизится.

Согласно данным рис. 2 существенная усадка полистирольной ориентированной пленки наблюдается при температурах, превышающих 80°C . Поэтому процесс запекания надо вести при температуре выше этого предельного значения; обычные значения рав-

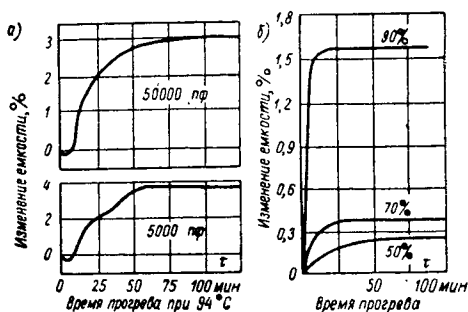


Рис. 17. Изменение емкости полистирольных секций в процессе их «запекания»: а — влияние емкости (размеров) секций на ход процесса при температуре 94°C ; б — влияние температуры на ход процесса при одних и тех же размерах секций (цифры у кривых — $t^{\circ}\text{C}$).

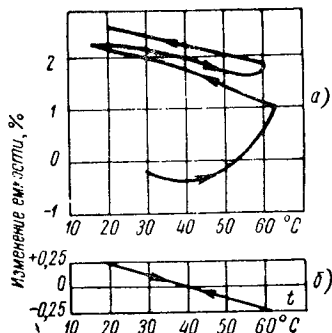


Рис. 18. Влияние «запекания» на температурную зависимость емкости полистирольного конденсатора: а — незапеченный образец; б — запеченный образец.

ны $90\text{--}95^{\circ}\text{C}$; иногда применяют даже 100°C при сокращенном времени выдержки секций в термостате. Подбор нужного времени выдержки производят экспериментально с учетом выбранного значения температуры, размера запекаемых секций, а также объема и загрузки термостата. При этом важно изучить распределение температуры внутри термостата и, по возможности, располагать в нем секции конденсаторов с таким расчетом, чтобы они находились в зоне нагрева с небольшим перепадом температур.

Проводятся также опыты по применению конвейерного принципа для процесса запекания: подвергаемые запеканию секции одна за другой с определенной скоростью продвигаются с помощью конвейерной ленты через трубчатый термостат с заданным распределением температуры по длине. При этом все секции проходят заведомо один и тот же режим запекания, если температура термостата и скорость конвейера регулируются с нужной степенью постоянства; это должно давать повышение однородности качества продукции.

Интересные результаты были получены при сравнении хода процесса запекания во времени для конденсаторных секций с алюминиевой и с свинцово-оловянной фольгой (рис. 19). Опыт проводился при толщине алюминиевой фольги 7,5 мк и свинцово-оловянной 7 мк. В отличие от конденсаторов с алюминиевой фольгой, при температурах запекания 90° С и выше образцы с обкладками из свинцово-оловянной фольги показывали сначала более резкое повышение емкости, которое затем сменялось относительно быстрым ее снижением до уровня ниже исходного значения. Для объяснения этого явления было высказано предположение, что при температуре этого порядка происходит выделение летучих продуктов из полистирольной пленки (остатки мономера и низкомолекулярные полимеры стирола); жесткая алюминиевая фольга допускает выход этих продуктов в окружающую среду через зазор между фольгой и пленкой в начальной

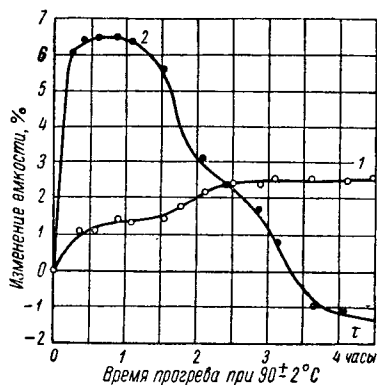


Рис. 19. Изменение емкости полистирольных секций с номиналом емкости 28 000 пф, в процессе запекания при температуре $90 \pm 2^\circ \text{C}$.

1 — обкладки из алюминиевой фольги;
2 — обкладки из свинцово-оловянной фольги.

стадии процесса запекания; мягкая же свинцово-оловянная фольга, плотно приликая к пленке по ее краям уже в начале процесса запекания, запирает выделяющиеся летучие внутри конденсатора и заставляет их образовывать «мешки» на поверхности раздела между пленкой и фольгой, приводящие к снижению емкости.

Если проводить запекание секций с обкладками из свинцово-оловянной фольги при температурах не выше $80\text{--}85^\circ \text{C}$, то описанных здесь аномалий в изменении емкости не происходит. Исследование потерь в весе образцов полистирольной пленки при ее прогреве, проведенное Е. И. Михайловой и Я. Я. Черняк, показано, что заметное удаление летучих начинается лишь после нагрева выше 85°C .

При изготовлении полистирольных конденсаторов с обкладками из фольги, после процесса их запекания при повышенной температуре, часто применяют тренировку в течение нескольких часов при верхнем пределе рабочей температуры

(обычно, 60°C), иногда даже повторяя данную операцию дважды; это способствует улучшению стабильности емкости во времени.

В настоящее время за рубежом известны две марки полистирольной пленки: с нормальной и с повышенной нагревостойкостью. В частности, итальянские фирмы импортируют из ФРГ пленки «стирофлекс 3» и «стирофлекс 6»: первая — для конденсаторов с рабочей температурой до 60°C , а вторая — до 70°C . По-видимому, различие в нагревостойкости на 10°C обусловлено только повышенной чистотой и более высоким молекулярным весом «стирофлекса 6». Согласно данным Карлтона, применяя полимер с повышенной температурой размягчения, тщательно очищенный от следов мономера и низших продуктов полимеризации, можно повысить примерно на 10°C температуру релаксации пленки и, соответственно, получить такой же выигрыш в рабочей температуре конденсатора.

Еще в 1953 г. одна из английских фирм сообщила, что новый процесс изготовления пленки и конденсаторов позволил расширить

температурный интервал их работы до $-40 \div +85^\circ \text{C}$; такие же пределы рабочей температуры были указаны в рекламном сообщении одной из французских фирм в 1958 г. со ссылкой на применение нового типа полистирольной пленки высокой степени чистоты. Американские фирмы обычно указывают рабочий интервал для полистирольных конденсаторов с пределами температуры от -55 до $+85^\circ \text{C}$.

Надо полагать, что во всех этих случаях используется полистирольная пленка, изготовленная из полистирола высокой степени чистоты с высоким молекулярным весом. По-видимому, верхний предел рабочей температуры, равный 85°C , конденсаторы из такой пленки могут выдерживать без резкого ухудшения своих электрических свойств, но при известном ухудшении стабильности емкости. Если требуется высокая стабильность емкости во времени и при воздействии циклов температуры, то даже для такой пленки с повышенной нагревостойкостью верхний предел температуры едва ли может лежать выше 70°C .

Очевидно, что при работе с пленкой, обладающей повышенной нагревостойкостью, приходится вносить соответствующие коррективы в режимы процесса запекания.

Неправильно подобранный режим запекания, особенно при использовании повышенных температур нагрева, может приводить к увеличению брака при испытании на пробой запеченных секций. Английские исследователи отмечали, что одной из причин такого брака может являться наличие частиц перхоти, опасное действие которых (растворение пленки содержащимися в частицах жирами) проявляется прежде всего при повышенных температурах (см. рис. 7).

Чаше проявляется другая причина этого брака: сближение краев фольги при деформации торцов секций (рис. 20), особенно опасное при повышенных температурах запекания, когда могут даже наблюдаться случаи короткого замыкания обкладок. Для уменьшения опасности повышенного брака по пробойу при запекании было сделано предложение¹ не добиваться при намотке точного совпадения краев обеих фольговых обкладок, как обычно, а, наоборот, сдвигать край одной обкладки влево, а другой направо, как показано на рис. 21. Тогда края обкладок не будут совпадать, и опасность снижения электрической прочности в процессе запекания должна уменьшиться.

Показанная на рис. 20, б деформация торцов секции из полистирольной ориентированной пленки после запекания обусловлена тем, что на закраинах, прилегающих к торцам, отсутствие фольги допу-

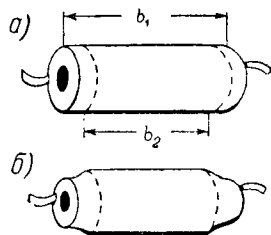


Рис. 20. Изменение формы секции из ориентированной полистирольной пленки в процессе запекания:

а — до запекания; б — после запекания.
 b_1 — ширина пленки; b_2 — ширина фольги.

¹ Англ. патент, кл. 37, № 748899, 16.05.1956, Дж. Фарнсуорт.

скают более сильное сокращение длины витков пленки, которые плотно прижимаются друг к другу. При достаточно высокой температуре прогрева может происходить даже «спекание» краев пленки на торцах и «остекловывание» торцов. Это повышает влагостойкость секции, затрудняя доступ влаги внутрь пространства между обкладками; поэтому в процессе запекания часто предусматривают кратковременное повышение температуры для «остекловывания» торцов.

Для того чтобы получить кратковременный нагрев торца секции без прогрева секции в целом, опасного с точки зрения снижения электрической прочности, было предложено проводить кратковременное нагревание торцов инфракрасными лучами;¹ для этого целесообразно применить конвейер, по которому секции двигаются к источникам инфракрасного облучения, обогревающим торцы секций; на этом же конвейере можно предусмотреть автоматическую проверку емкости и испытание на пробой.

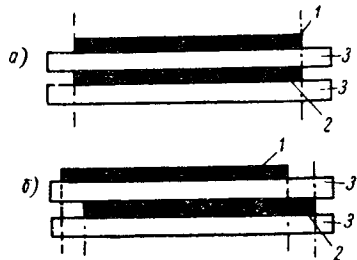


Рис. 21. Расположение обкладок и диэлектрика при намотке со скрытой фольгой:

а — обычное; б — по патенту Фарнсуорта.
1 — первая обкладка; 2 — вторая обкладка; 3 — диэлектрик (пленка).

Выше были указаны значения нижнего предела рабочей температуры для полистирольных конденсаторов, равные по зарубежным данным $-40 \div -55^\circ \text{C}$. Отечественные нормы обычно указывают нижний предел, равный -60°C , но для отдельных вариантов конструкций открытого типа его повышают до 0°C . Это связано с возможностью снижения электрической прочности конденсаторов при резком охлаждении, которое иногда наблюдалось для некоторых партий, прошедших

интенсивный процесс запекания и сильно «остеклованных». По-видимому, в таких случаях за счет различия в коэффициентах расширения полистирола и материала обкладок может происходить местное растрескивание, облегчающее пробой; взятая в отдельности полистирольная пленка, так же как и незапеченные конденсаторные секции, даже при сильном охлаждении не показывают снижения электрической прочности.

Для секций обычной намотки (со скрытой фольгой и вкладными контактами, см. рис. 14, а), особенно при обкладках из алюминиевой фольги, возникает опасность постепенного увеличения переходного сопротивления между вкладным контактом и обкладкой, сопровождающегося соответствующим увеличением угла потерь. При малых напряжениях, порядка 0,1—1 в или ниже, может даже наблюдаться «обрыв», т. е. потеря емкости. Для устранения этой опасности применяется точечная приварка вкладных контактов к фольге. Преимущество конденсаторов с приваренными контактами в сравнении с конденсаторами, в которых вкладные контакты не приваривались к фольге, по данным Хеннигера, показано на рис. 22.

¹ Франц. патент, кл. H01g, № 1129653, 24.01.1957, фирма Капа.

Отсутствие приварки контактов приводит к заметному возрастанию угла потерь при воздействии температурных циклов, особенно при одновременном действии тряски, которая способствует нарушению контактирования. Для улучшения контакта между вкладным неприваренным выводом и фольгой было предложено¹ делать шероховатой поверхность вкладки полоски контактной медной фольги путем отбивки песком, царапання металлической щеткой или металлизацией ее методом распыления (алюминием, цинком или припоем). При этом отдельные неровности поверхности контакта прокалывают оксидный слой на поверхности фольговых обкладок и обеспечивают резкое снижение переходного сопротивления между обкладкой и выводом. Можно все же думать, что приварка выводного контакта дает более радикальное решение данной проблемы.

Для секций с выступающей фольгой производится припайка или приварка выводного проводника непосредственно к обкладке (фольге), выступающей на торце секции; это обеспечивает достаточно надежный контакт. При изготовлении металлизированных полистирольных конденсаторов после намотки секций на их торцы наносится напылением слой металла или сплава, контактирующий с разноименными обкладками, т. е. со слоями металла, нанесенного на пленку; к напыленному на торец секции металлу (обычно свинцово-оловянный сплав) припаивается выводной проводник.

Было предложено² вместо припайки выводных проводников к контактирующей торцевой накладке проводить их присоединение электросваркой. Для этого выводная проволока приближается к контактной металлической поверхности на торце секции причем между ними возбуждается электрический разряд; затем проволока быстро доводится до соприкосновения с поверхностью контактного торцевого слоя, образуя с ним полный электрический контакт. В результате получается надежная приварка выводной проволоки к металлическому слою на торце, причем нагрев происходит локализованно и не повреждает диэлектрика секции. Этот метод удобен для автоматизации; секции могут под-

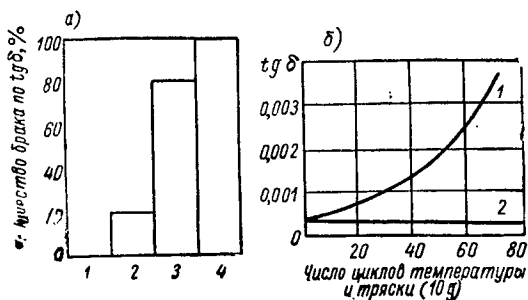


Рис. 22. Влияние приварки вкладных контактов на стабильность величины угла потерь полистирольных конденсаторов: а — увеличение количества забракованных по углу потерь конденсаторов при норме $\text{tg } \delta \leq 10 \cdot 10^{-4}$ (при 0,3 Мгц) при увеличении количества циклов испытания.

1 — исходная партия; 2 — после 5 циклов изменения температуры от 10 до 60° С; 3 — после 10 циклов; 4 — после 20 циклов и тряски 35 гц при 10г в течение 8 мин;

б — зависимость $\text{tg } \delta$ от числа циклов температуры при воздействии тряски 10г.

1 — контакты не приварены; 2 — контакты приварены (измерение $\text{tg } \delta$ при частоте 250 кГц).

¹ Англ. патент, кл. 37, № 836542, 26.04.1961, П. А. Споринг.

² Англ. патент, кл. 83 (2), 83 (4), № 826286, 31.12.1959, Ф. Кларк.

водиться конвейером к двум проволокам, сматывающимся с катушек, и привариваться к ним с последующей отрезкой нужной длины проволоки с каждой стороны. Для получения разряда можно применить накопительный конденсатор, отдающий свою энергию в момент сварки, а далее автоматически заряжаемый.

Если производить намотку полистирольных секций с контролем емкости, как отмечалось выше, добиваясь значения емкости намотанной секции несколько ниже номинала, с учетом возрастания емкости в процессе запекания, то можно получить достаточно узкие пределы допуска по емкости, до $\pm 2 \div 3\%$, во всяком случае — до 5%. Если требуется большая точность емкости, порядка $\pm 0,5 \div 1\%$, то приходится прибегать к подгонке емкости.

Простейшим способом является сборка конденсатора из двух одинаковых соединенных параллельно секций с емкостью, близкой к половине номинального значения. Подбирая из изготовленной партии секций (после их проверки и рассортировки по емкости) пары со значениями емкости выше и ниже половины номинального значения, можно легко обеспечить узкий допуск по емкости.

На этом принципе в Народной Республике Болгарии выпускают конденсаторы открытого типа под названием «дуплекс» с допуском по емкости $\pm 1\%$, представляющие собой две параллельно соединенные цилиндрические секции с подобранными значениями емкости, обернутые пленкой полистирола увеличенной толщины, которая плотно скрепляет секции при дополнительной операции запекания.

Другой аналогичный вариант — сборка конденсатора также из двух параллельно соединенных секций, но разной емкости: одна — основная, имеющая емкость, близкую к номиналу, но немного ниже его; вторая — малой емкости, «довесок», с емкостью, равной разности между номинальным значением и емкостью основной секции. При этом методе надо иметь большие наборы «довесков» с различными значениями емкости, из которых было бы легко подбирать нужные величины для добавки к емкости основных секций.

Было предложено¹ для изготовления «довесков» с емкостями от нескольких единиц до нескольких сотен пикофард применить следующий метод: на намоточную правку наматывать несколько холостых витков полистирольной пленки; далее — первую фольговую обкладку длиной, примерно равной длине окружности последнего холостого витка; к этой обкладке (в середине) приварить точечной сваркой выводной контакт; далее намотать нужное число витков полистирольной пленки, служащей диэлектриком и определяющей величину емкости, затем опять намотать один виток фольги — вторую обкладку — и также присоединить к ней вывод; наконец намотать холостые защитные витки пленки, заклеить секции и снять с оправки, после чего «запечь» ее. Емкость таких секций удобно менять, в широких пределах изменяя число витков пленки между обкладками или ширину обкладок. От длины обкладок емкость в данном случае практически не зависит.

¹ Англ. патент, кл. 37, № 807475, 14.01.1959, К. В. Бантон.

Если почему-либо неудобно изготовлять конденсатор из двух параллельно соединяемых секций, то иногда применяют конструкцию с подгоночными обкладками; в этом случае перед концом намотки одну из лент фольги обрывают (сохраняя вторую еще не оборванной) и, продолжая процесс, вкладывают несколько изолированных друг от друга и от основной фольги кусочков фольги разной ширины, служащих дополнительными обкладками; от каждой из этих обкладок осуществляется отдельный вывод. Тогда по отношению ко второй длинной ленте фольги мы имеем основную емкость, образованную первой длинной обкладкой (оборванной перед концом намотки) и ряд добавочных емкостей, величина которых определяется шириной дополнительных обкладок (в направлении длины основных лент). После запекания измеряется основная емкость и, в случае необходимости, для получения требуемого приближения к номиналу к ней присоединяются параллельно одна или больше подгоночных емкостей.

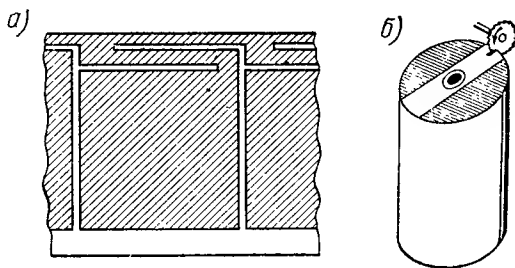


Рис. 23. Метод подгонки емкости металлизированных конденсаторов по патенту Биндера: *а* — схема нанесения изолирующей дорожки на одну из обкладок; *б* — надрезка торца секции для отсоединения части элементарных обкладок.

Представляют интерес попытки изменения емкости полистирольной секции уже после запекания, без использования принципа дополнительных обкладок, которые затрудняют намотку, снижая ее производительность.

Было предложено¹ для точной подгонки емкости пленочных конденсаторов (например, полистирольных) наматывать их с таким расчетом, чтобы емкость была немного ниже номинала, а затем прессовать в разогретом виде с одновременным контролем емкости, повышая ее до заданного значения. В данном случае имеются в виду конденсаторы малой емкости, порядка нескольких сотен пикофард.

Интересный способ подгонки емкости был предложен² применительно к изготовлению металлизированных конденсаторов (с односторонней металлизацией ленты диэлектрика). В этом случае на одной из металлизированных лент по слою металла выжигаются изолирующие «дорожки», как показано на рис. 23, *а*, разбивающие обкладку на ряд небольших параллельно включаемых элементарных участков, соединение которых осуществляется узкими проводящими мостиками у верхнего края ленты. Намотка секций производится с таким расчетом, чтобы получить емкость, лежащую в заданных пределах или немного выше. Снижение емкости до нужного значения можно получить, делая прорез на краю торца секции, как показано на рис. 23, *б*; при этом разрезают несколько соединительных мостиков и часть элементарных участков обкладки отсоединяют, приводя к соответствующему снижению емкости.

¹ Патент ФРГ, кл. 21g, 10/02, № 960913, 28.03.1957, В. Пранг.

² Патент ФРГ, кл. 21g, 10/02, H01g, № 1028692, 9.10.1958, В. Биндер.

При расчете числа витков полистирольных секций, как и для других типов намотанных конденсаторов, можно пользоваться обычными формулами:

а) для цилиндрических секций, наматываемых на оправку, диаметром D_0 число витков

$$N = \frac{2,5 \cdot 10^3 (D - D_0)}{d + d_0}, \quad (1)$$

где D — диаметр (наружный) секции, намотанной на оправку:

$$D = \sqrt{D_0^2 + kC} \quad (2)$$

и

$$k = \frac{0,144 (d + d_0) d}{\epsilon b}; \quad (3)$$

здесь C — в мкф , D , D_0 и b (ширина фольги) в см , а толщина диэлектрика d и толщина фольги (обкладки) d_0 — в мм ;

б) для плоских секций, наматываемых на тонкую плоскую оправку, шириной B см , число витков так же, как и d

$$N = \sqrt{k_1 C + k_2^2} - k_2, \quad (4)$$

где

$$k_1 = \frac{7,05 \cdot 10^5 d}{\epsilon b (d + d_0)} \quad (5)$$

и

$$k_2 = \frac{1,25 \cdot 10^3 B}{d + d_0}. \quad (6)$$

Величину диэлектрической проницаемости ϵ , входящую в эти формулы, при использовании обкладок из фольги надо брать несколько ниже, чем указывается в литературе для полистирольной пленки, так как даже при запекании в цилиндрических секциях неизбежно остается некоторое количество воздушных включений, снижающих эффективное значение ϵ . В этом случае обычно принимают $\epsilon = 2,2$. При металлизации можно принимать $\epsilon \approx 2,5$. При фольговых обкладках и плоскопрессованной форме секций берется некоторое промежуточное между указанными здесь предельными величинами значение ϵ , которое следует уточнить опытным путем применительно к выбранным значениям давления при прессовке и другим технологическим факторам.

Входящее в указанные выше формулы значение ширины фольги b соответствует ее активной ширине; при обычной намотке, со скрытой фольгой, это значение равно фактической ширине ленты фольги; при намотке с выступающей фольгой («безындукционной» намотке) под значением b надо понимать ширину, на которой разноименные обкладки перекрывают друг друга; для определения b от фактической ширины ленты надо отнять ширину изолирующей закраины и ширину участка фольги, выступающего за плоскость

торца секции для пайки; в случае металлизированных конденсаторов для нахождения b надо от ширины металлизированного слоя отнять ширину закраины.

Выбор толщины диэлектрика при малых напряжениях определяется возможностью получения пленки с минимальной толщиной; при повышенных напряжениях исходят из допустимого значения напряженности поля и заданного значения рабочего напряжения. Этот вопрос мы рассмотрим подробнее в разделе об электрических свойствах полистирольных конденсаторов. Как уже отмечалось, полистирол обладает малой, но все же конечной гигроскопичностью, а потому может ухудшать свои электрические свойства при воздействии влажности (см. рис. 3). Кроме того, полистирольная пленка обладает известной влагопроницаемостью: коэффициент вла-

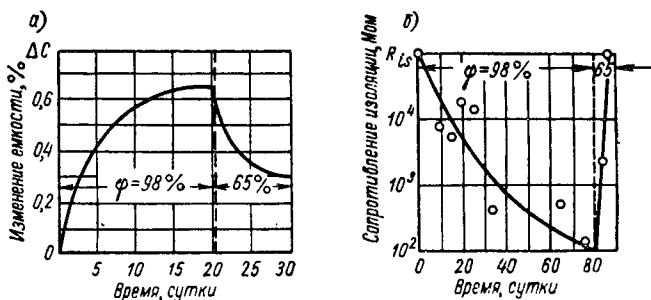


Рис. 24. Влияние влажности на электрические характеристики полистирольных конденсаторов: а — изменение емкости запеченной секции; б — изменение сопротивления изоляции секции, герметизированной в металлической трубке, с выводными стеклянными изоляторами.

гопроницаемости P составляет для нее около $6 \cdot 10^{-9}$ г/см $\cdot$ час $\cdot$ торр, а коэффициент диффузии порядка $3 \cdot 10^{-4}$ см 2 /час; эти значения можно считать повышенными в сравнении с такими диэлектриками, как полиэтилен или политетрафторэтилен.

Поэтому незащищенные секции из полистирольной пленки заметно ухудшают свои электрические свойства при воздействии повышенной влажности; запекание секций, сопровождающееся «остекловыванием» торцов, улучшает влагостойкость полистирольного конденсатора, но даже и в этом случае при воздействии высокой относительной влажности (95—100%) будет наблюдаться снижение сопротивления изоляции и рост угла потерь, а также изменение емкости, хотя и небольшое, но уже недопустимое для ряда типов конденсаторов с узким допуском (рис. 24, а); при возвращении запеченного конденсатора в условия нормальной влажности восстановление электрических свойств происходит неполностью или требует достаточно большого времени.

Герметизация полистирольных конденсаторов в металлических трубчатых корпусах со стеклянными изоляторами не может обес-

печить их длительную работу при высокой влажности, так как при этом происходит резкое снижение сопротивления изоляции за счет возрастания поверхностной проводимости стекла (рис. 24, б); емкость и угол потерь при этом изменяются мало, а сопротивление изоляции относительно быстро восстанавливается при возвращении к нормальной влажности; тем не менее при стеклянных изоляторах, в условиях высокой влажности, полистирольный конденсатор те-

ряет одно из своих больших преимуществ — высокую постоянную времени. Поэтому при герметизации полистирольных конденсаторов в паяных металлических корпусах применяют керамические выводные изоляторы, поверхностное сопротивление которых более устойчиво при воздействии влажности.

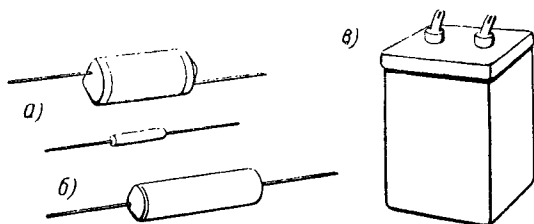


Рис. 25. Различные варианты конструкции отечественных полистирольных конденсаторов: а — открытая; б — уплотненная; в — герметизированная конструкция.

Отечественные конструкции полистирольных конденсаторов показаны: на рис. 25, а — конденсаторы открытой конструкции (тип ПО или ПСО); на рис. 25, б — уплотненная конструкция в металлической трубке с заливкой торцов эпоксид-смолой (тип ПМ-2); на рис. 25, в — герметизированная конструкция в металлическом корпусе, с припаянной металлической крышкой и впаянными керамическими изоляторами (типы МПГ, МПГТ, МПГО).

В зарубежной практике выпускаются преимущественно конденсаторы открытой конструкции (рис. 26), пригодные для работы при влажности до 80%, хотя в отдельных случаях изготавливаются и герметизированные конденсаторы. В указанных здесь обозначениях отечественных типов конденсаторов индекс «МП» (металлопленочные) относится к металлизированным полистирольным конденсаторам, производство которых в СССР достигло широкого развития. За рубежом металлизация полистирола не получила пока большого распространения, хотя отдельные сообщения о свойствах металлизированных конденсаторов встречаются в печати (итальянская работа Делла Джиованна, реклама английской фирмы ТСС и т. д.).

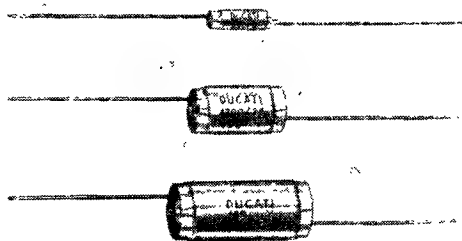


Рис. 26. Итальянские полистирольные конденсаторы открытого типа.

§ 4. Электрические свойства полистирольных конденсаторов

А. Точность и стабильность емкости

Полистирольные конденсаторы можно изготавливать с малым отклонением емкости от номинала, но это требует применения специальной подгонки емкости, связанной с усложнением конструкции или технологии производства. Поэтому наряду с особо узкими допусками по емкости для полистирольных конденсаторов применяют и обычные значения: ± 5 , ± 10 и $\pm 20\%$, такие же, как и для бумажных конденсаторов.

С этими допусками обычно изготавливают конденсаторы небольшой емкости открытой конструкции, рассчитанные на общее применение в радиоприемной и телевизионной аппаратуре.

Конденсаторы с более высокими значениями емкости и герметизированного типа изготавливают с более узкими значениями допуска; так, для отечественного типа МПГ при емкостях до $0,01 \text{ мкф}$ нижний предел допуска по емкости равен $\pm 2\%$, а при емкостях выше $0,01 \text{ мкф}$ снижен до $\pm 1\%$. Конденсаторы типа МПГТ повышенной точности изготавливаются с допуском по емкости $\pm 0,5$ и $\pm 0,2\%$, а один из вариантов конденсаторов этого типа емкостью $0,5 \text{ мкф}$ — даже с допуском $\pm 0,1\%$.

Французские фирмы указывают нижний предел допуска, равный $\pm 0,5\%$ ($0,5 \text{ нф}$); по итальянским данным для обычных полистирольных конденсаторов при емкостях до 200 нф — нормальный минимальный допуск $\pm 5\%$ и при емкостях от 200 до 1000 нф — $\pm 2\%$ (или $\pm 1 \text{ нф}$); специальный допуск при больших значениях емкости $\pm 0,5\%$. По данным ГДР и ФРГ, также указывается минимальный допуск $\pm 0,5\%$, осуществляемый с применением подгоночных секций. По американским данным для миниатюрных полистирольных конденсаторов открытого типа минимальный допуск по емкости равен $\pm 1\%$, а для герметизированных конденсаторов особо точного типа емкостью $1\text{—}10 \text{ мкф}$ подгонка емкости может быть проведена с допусками $\pm 0,5$; $\pm 0,25$ и $\pm 0,1\%$. Достижение столь малых отклонений емкости от номинала, очевидно, связано с повышением стоимости конденсатора.

Отечественная норма на величину температурного коэффициента емкости (ТКЕ) полистирольных конденсаторов составляет $-200 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$; фактически абсолютное значение ТКЕ всегда ниже этого предела. Для конденсаторов с обкладками из алюминиевой фольги были найдены следующие значения ТКЕ при разных значениях емкости: образцы 2000 нф — величина ТКЕ в пределах от -100 до $-185 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, образцы $10\,000 \text{ нф}$ — от -75 до $-165 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ и образцы $0,02\text{—}0,25 \text{ мкф}$ — от -80 до $-130 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$; для опытных образцов с обкладками из свинцово-оловянной фольги были получены значения от -60 до $-100 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, т. е. несколько ниже, чем для конденсаторов с алюминиевыми обкладками.

По данным Е. И. Михайловой и Н. В. Северюхиной для металлизированных полистирольных конденсаторов (при односторонней

металлизации) ТКЕ лежит в пределах от -30 до $-150 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, составляя в среднем $-75 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. По-видимому, при двусторонней металлизации можно получить небольшое дополнительное снижение ТКЕ.

Некоторые данные о характере температурной зависимости емкости полистирольных конденсаторов показаны на рис. 27. По итальянским данным в пределах температуры $\pm 60^\circ \text{C}$ эта зависи-

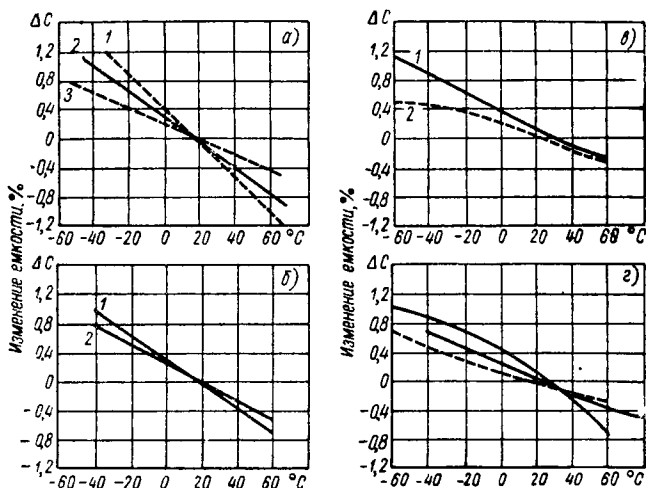


Рис. 27. Температурная зависимость емкости полистирольных конденсаторов:

а — по каталогу фирмы «Икар».

1 — ТКЕ = $-210 \cdot 10^{-6}$; 2 — ТКЕ = $-150 \cdot 10^{-6}$ (среднее); 3 — ТКЕ = $-90 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$;

б — по Дзанобетти.

1 — ТКЕ = $-162 \cdot 10^{-6}$; 2 — ТКЕ = $-132 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$;

в — по данным других фирм.

1 — обкладки из алюминиевой фольги; ТКЕ = $-130 \cdot 10^{-6}$; 2 — металлизация: ТКЕ = $-75 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$; *г* — сопоставление образцов с разными обкладками.

1 — алюминиевая фольга, по Думмеру и Норденбергу: ТКЕ = $-138 \cdot 10^{-6}$; 2 — свинцово-оловянная фольга, по Уиксу, ТКЕ = $-100 \cdot 10^{-6}$; 3 — односторонняя металлизация, по Е. И. Михайловой и И. В. Северюхиной: ТКЕ = $-83 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$.

мость имеет прямолинейный характер (рис. 27, *а* и *б*); по-видимому, итальянские кривые несколько идеализированы, так как по данным рис. 27, *в*, а также по англо-американским и отечественным данным (рис. 27, *г*), может наблюдаться некоторое отклонение от линейного закона как в области низких, так и повышенных температур. Преимущество металлизации в отношении ослабления температурной зависимости емкости наглядно видно при сравнении сплошных и пунктирных кривых на рис. 27, *в* и *г*.

Зарубежные фирмы обычно указывают средние значения ТКЕ полистирольных конденсаторов, предпочитая не оговаривать определенной нормы; западноевропейские фирмы приводят среднее

значение: $-150 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, тогда как в рекламах американских фирм чаще указывается значение $-100 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Французская фирма ЛТТ для нового типа конденсаторов из пленки повышенной нагревостойкости указывает значение $\text{ТКЕ} = -(100 \pm 50) \times 10^{-6} \text{ град}^{-1}$.

Анализ вопроса о величине ТКЕ полистирольных конденсаторов был проведен Е. Г. Навяжской. По ее предположению величина ТКЕ должна лежать в пределах между значением, соответствующим свободному расширению диэлектрика и обкладок:

$$\text{ТКЕ} = \alpha_{\epsilon} + 2\alpha_{\text{м}} - \alpha_{\text{д}}, \quad (7)$$

и значением, соответствующим полному отсутствию возможности расширения обкладок:

$$\text{ТКЕ} = \alpha_{\epsilon} + \alpha_{\text{д}}. \quad (8)$$

Здесь α_{ϵ} — температурный коэффициент диэлектрической проницаемости полистирола;

$\alpha_{\text{д}}$ — коэффициент его линейного расширения и

$\alpha_{\text{м}}$ — коэффициент линейного расширения металла обкладок.

Значение $\alpha_{\text{д}}$ принимается равным $80 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Подставляя это значение и величину $\epsilon = 2,5$ в выражение для температурного коэффициента диэлектрической проницаемости неполярных твердых веществ

$$\alpha_{\epsilon} = -\frac{(\epsilon - 1)(\epsilon + 2)}{\epsilon} \alpha_{\text{д}}, \quad (9)$$

получаем для полистирола значение $\alpha_{\epsilon} = -216 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$.

При свободном расширении диэлектрика и обкладок (незапеченная секция) $\text{ТКЕ} = (-216 + 2 \cdot 25 - 80) \cdot 10^{-6} = -246 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. (Здесь для алюминия принято $\alpha_{\text{м}} = 25 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$); при отсутствии расширения обкладок (сильное запекание или металлизация) $\text{ТКЕ} = (-216 + 80) \cdot 10^{-6} = -136 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Эти значения несколько завышены в сравнении с указанными ранее опытными значениями; это расхождение можно объяснить наличием воздушных включений, остающихся между пленкой полистирола и обкладками даже после запекания (или при односторонней металлизации). Используя значение эффективной диэлектрической проницаемости $\epsilon_{\text{эфф}}$ и величину температурного коэффициента этой характеристики α'_{ϵ} (считая слои воздуха и пленки включенными последовательно), которые соответственно равны:

$$\epsilon_{\text{эфф}} = \frac{\epsilon_{\text{п}}}{\epsilon_{\text{п}} \vartheta_0 + \vartheta_{\text{п}}}. \quad (10)$$

и

$$\alpha'_{\epsilon} = \epsilon_{\text{эфф}} \left(\frac{\vartheta_0 \alpha'_{\epsilon_0}}{\epsilon_0} + \frac{\vartheta_{\text{п}} \alpha_{\epsilon_{\text{п}}}}{\epsilon_{\text{п}}} \right), \quad (11)$$

(где ϑ обозначает относительную концентрацию воздуха и полистирола и индексы «0» и «п» относятся соответственно к воздуху и полистиролу), Навяжская произвела расчеты по указанным выше

формулам для разных значений относительного содержания воздуха и получила результаты, приведенные на рис. 28. Согласие с опытом получается при относительно очень большом остаточном содержании воздуха; это позволяет считать, что результаты этих расчетов могут только качественно оценить наблюдаемую зависимость.

Таким образом, ТКЕ полистирольных конденсаторов невелик и существенно отрицателен по величине. В этом отношении данные конденсаторы уступают лучшим слюдяным конденсаторам группы Г, для которых $\text{ТКЕ} = \pm 50 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, но уже превосходят

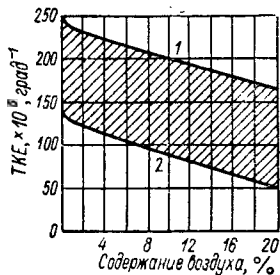


Рис. 28. Расчетные пределы колебаний ТКЕ полистирольного конденсатора в зависимости от содержания остаточного воздуха (в предположении последовательной схемы включения воздуха и полистирола).

1 — свободное расширение обкладок; 2 — обкладки расширяются вместе с диэлектриком.

слюдяные конденсаторы следующей группы В, для которых ТКЕ может колебаться в пределах от -100 до $+100 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$.

Стабильность полистирольных конденсаторов при длительном хранении и при систематическом воздействии температурных циклов хотя и хуже, чем у слюдяных конденсаторов высокого класса (для которых колебания емкости во времени, при тщательном изготовлении, составляют $0,01-0,02\%$), но все же достаточно удовлетворительна для многих случаев ответственного применения электрических конденсаторов. В литературе можно найти довольно разноречивые данные о стабильности емкости полистирольных конденсаторов; различия, очевидно, связаны с разными номинальными данными, различным конструктивным оформлением и различием условий хранения; к сожалению, часто эти существенные факторы не оговариваются, что затрудняет правильную оценку литературных данных.

По данным Гешка и Ланге (ФРГ), изменение емкости за первый год хранения составляет $+0,2\%$ (по-видимому, герметизированные конденсаторы с обкладками из алюминиевой фольги; условия хранения не указаны); по данным Апри (Франция) изменение емкости за первый год хранения — до $0,5\%$, за второй год хранения — до $0,8\%$, а далее не более $0,1\%$ за год; после 5 циклов изменения температуры от -40 до $+66^\circ\text{C}$ остаточное изменение емкости — порядка $0,05\%$; по данным Мистича (США) после 10 циклов изменения температуры от -60 до $+70^\circ\text{C}$ остаточное изменение емкости — не более $0,05\%$; по данным Карлтона (Англия) при длительном воздействии температурных циклов от -40 до $+70^\circ\text{C}$ изменение емкости меньше $0,25\%$; по данным Козенса (Англия) стабильность емкости во времени составляет до $0,1\%$; такое же значение указывает фирма Сауверн Электрик (США). По другому сообщению той же фирмы уход емкости за год не превышает $0,05\%$ (это относится к герметизированным конденсаторам высокой точности).

На рис. 29, а приведены данные Дзанобетти о статистическом разбросе изменений емкости конденсаторов итальянской фирмы Икар при длительном испытании воздействием термических циклов от -20 до $+40^{\circ}\text{C}$: за 1000 суток, т. е. почти за 3 года уход

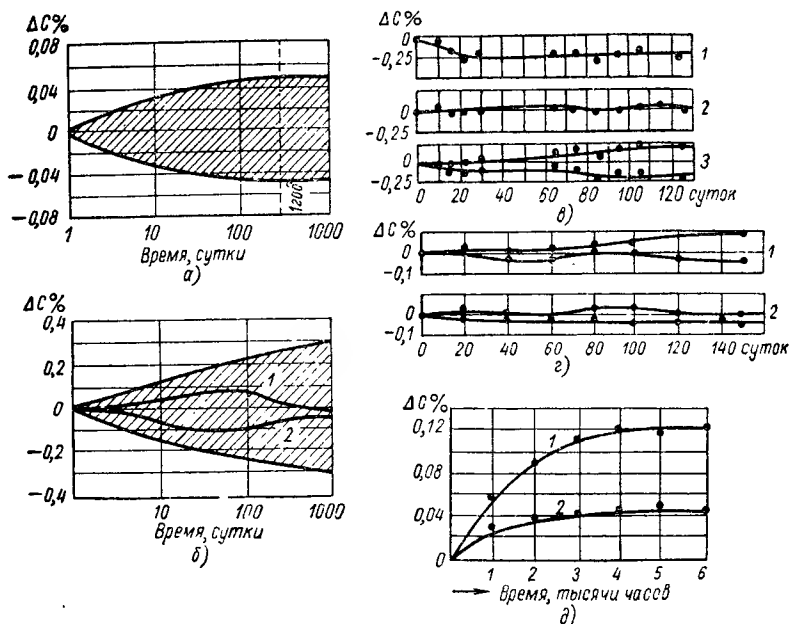


Рис. 29. Стабильность емкости полистирольных конденсаторов во времени при различных условиях хранения:

а — область разброса изменений емкости для конденсаторов фирмы «Икар», по данным Дзанобетти: длительное воздействие циклов колебания температуры от -20 до $+40^{\circ}\text{C}$; б — область разброса изменений емкости для конденсаторов фирмы «Дукати»; условия хранения не указаны; на фоне области разброса две кривые для случайно взятых конденсаторов, 1 — 1500 нФ на 125 В ; 2 — 5000 нФ на 250 В ;

в — результаты наблюдения за изменением емкости герметизированных конденсаторов с обкладками из алюминиевой фольги с течением времени (каждые сутки 8 ч при 60°C и 16 ч при 20°C) (по данным В. Т. Ренне, Е. И. Михайловой и Я. Я. Черняк).

1 — емкость 2000 нФ , 2 — $0,01\text{ мкФ}$, 3 — $0,03\text{ мкФ}$;

г — то же, что на рис. 29, в, но при хранении в комнатных условиях.

1 — емкость $0,01\text{ мкФ}$; 2 — емкость $0,03\text{ мкФ}$;

д — средние данные об изменении емкости металлизированных полистирольных конденсаторов, по Е. И. Михайловой и Н. В. Северюхиной;

1 — хранение в комнатных условиях; 2 — хранение в естественных климатических условиях (на открытом воздухе; защита от непосредственного действия осадков).

емкости не превышает $\pm 0,05\%$, причем уже после истечения года емкость практически стабилизуется. По-видимому, эти данные относятся к герметизированному типу полистирольных конденсаторов.

Рис. 29, б показывает аналогичные данные для конденсаторов другой итальянской фирмы — Дукати, взятые из каталога фир-

мы; условия испытания не указаны; изменения емкости резко повышены в сравнении с данными на рис. 29, а; это позволяет думать, что на этот раз приведены результаты испытания конденсаторов открытого типа. На рис. 29, в приведены результаты наблюдения за изменением емкости отечественных конденсаторов герметизированного типа с обкладками из алюминиевой фольги при длительном воздействии температурных циклов от 20 до 60° С (за сутки 8 ч при 60° С, остальное время при 20° С); этот рисунок подтверждает итальянские данные о том, что при длительном старении может наблюдаться как возрастание, так и уменьшение емкости полистирольного конденсатора; испытание нескольких десятков образцов с емкостью от нескольких тысяч до нескольких десятков тысяч пикофард показало, что в данных условиях испытания изменения емкости не выходили за пределы $\pm 0,2 \div 0,25\%$.

На рис. 29, г показаны типичные результаты аналогичного испытания таких же конденсаторов, но только при хранении в комнатных условиях; в этом случае изменения емкости не выходили за пределы $\pm 0,1 \div 0,13\%$.

На рис. 29, д показаны средние результаты испытания герметизированных полистирольных конденсаторов с металлизированными обкладками (металло-пленочных): кривая 1 получена при хранении в комнатных условиях, а кривая 2 — при хранении на открытом воздухе с защитой конденсаторов от непосредственного воздействия осадков. Интересно, что во втором случае изменения емкости оказались меньше; это следует объяснять тем, что среднее значение температуры при таком испытании было ниже среднего значения комнатной температуры, а повышенная влажность окружающей среды не оказала влияния ввиду надежной герметизации конструкции. Опыт показал, что конденсаторы с металлизированными обкладками дают постепенное возрастание емкости, причем емкость стабилизируется примерно по истечении полугода; установившееся изменение емкости в комнатных условиях оказалось равным 0,12%, т. е. того же порядка, что и полученное ранее значение для герметизированных конденсаторов с обкладками из фольги.

Можно полагать, что для правильно запеченных и хорошо герметизированных конденсаторов при их хранении или работе в комнатных условиях средние изменения емкости не должны превышать 0,05—0,1%, причем стабилизация емкости должна наступать за 0,5—1 год. Для конденсаторов открытого типа, даже в комнатных условиях, особенно при малых значениях емкости, изменения могут быть больше и составлять несколько десятых процента; при повышенной влажности и колебаниях температуры в пределах рабочего интервала колебания емкости для конденсаторов открытого типа, по-видимому, могут достигать величины порядка 1% или даже превышать это значение. Герметизированные конденсаторы и в этих условиях, вероятно, не должны меняться более чем на 0,25—0,5%.

В некоторых случаях может возникнуть необходимость небольшой подстройки емкости полистирольного конденсатора уже после его монтажа в аппаратуре. Конденсаторы, позволяющие производить такую подстройку, выпускаются в США под названием «подстроечных» полистирольных конденсаторов. В них используются секции с выступающей фольгой особой намотки, обеспечивающей большую стабильность в отсутствие внешнего давления. Изменяя давление на секцию с помощью нажимного винта, можно изменять ее емкость от номинального значения в пределах $\pm 1 \div 1,5\%$. В пределах до $\pm 0,25\%$ емкость меняется линейно с углом поворота винта. Применение намотки с выступающей фольгой обеспечивает снижение угла потерь и индуктивности конденсатора. Стабильность установленного значения емкости во времени, по рекламным данным, равна $0,03\%$. Точность подгонки емкости к номинальному значению, составлявшая ранее $\pm 0,1\%$, по данным рекламы 1961 г., доведена до $\pm 0,01\%$. Номинальные данные конденсаторов: у одной фирмы 200 в и $0,01\text{—}1\text{ мкф}$, а у другой $100\text{—}400\text{ в}$ и $1\text{—}10\text{ мкф}$. Внешний вид подобных конденсаторов показан на рис. 30. Выпуск аналогичных конденсаторов, но с регулировкой емкости в пределах $\pm 10\%$, начат в Англии.

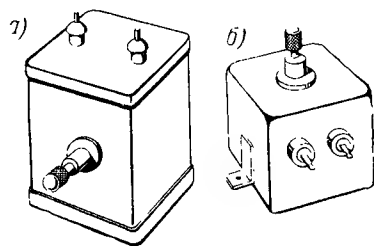


Рис. 30. Подгоняемые точные полистирольные конденсаторы: а — вариант с нажимным винтом (для подстройки емкости) на боковой стенке корпуса; б — вариант с нажимным винтом на крышке конденсатора.

Высокая стабильность емкости полистирольных конденсаторов позволяет использовать их для изготовления магазинов емкости. Так, завод в г. Гера (ГДР) изготавливает полистирольные магазины с пределами изменения емкости: $0,001\text{—}1,111\text{ мкф}$ с допуском $\pm 0,5\%$. Применение добавочного конденсатора 5 мкф расширяет диапазон емкости магазина до $6,111\text{ мкф}$.

Б. Величина угла потерь

Полистирольные конденсаторы имеют малый $\text{tg}\delta$, приближающийся по величине к тем значениям, которые можно получать для доброкачественных слюдяных или высокочастотных керамических конденсаторов. Отечественная норма на величину угла потерь герметизированных полистирольных конденсаторов: $\text{tg}\delta \leq 10 \cdot 10^{-4}$ при 20°С и $15 \cdot 10^{-4}$ при 60°С . (Для слюдяных конденсаторов типов КСО и КСГ при емкостях выше 200 нф оговариваются такие же значения.) Для некоторых типов полистирольных конденсаторов открытой конструкции норма увеличена, соответственно, до $15 \cdot 10^{-4}$ при 20°С и до $20 \cdot 10^{-4}$ при $60\text{—}70^\circ\text{С}$. Фактически величина $\text{tg}\delta$ лежит значительно ниже этих предельных величин и обычно составляет менее $5 \cdot 10^{-4}$, особенно при малых емкостях и не очень

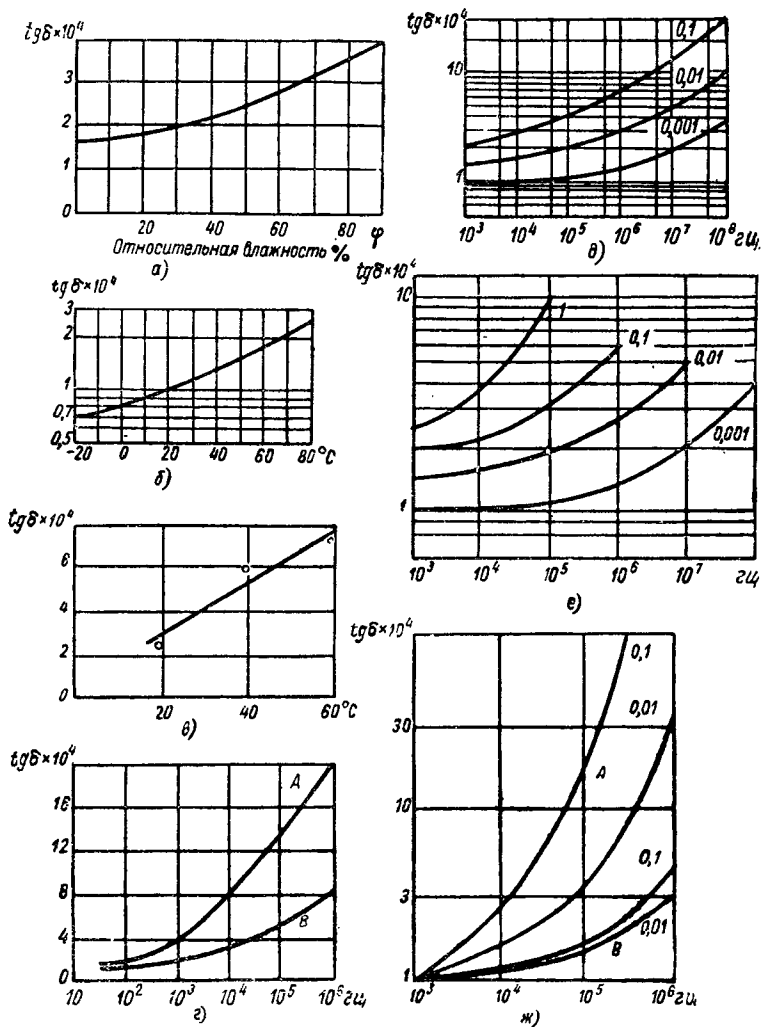


Рис. 31. Зависимость угла потерь полистирольных конденсаторов от различных факторов:

а — влияние относительной влажности; б — влияние температуры (обкладки из фольги); в — влияние температуры (металло-пленочный конденсатор); г — влияние частоты при разной намотке.

д — влияние частоты при разной емкости; е — то же, по каталогу фирмы; ж — влияние частоты при разной емкости и разной намотке.

А — скрытая фольга, В — выступающая.

высоких частотах. В зарубежных рекламных данных обычно указываются значения $\operatorname{tg} \delta \approx 1 \div 2,5 \cdot 10^{-4}$, представляющие собой нижний предел, который можно получить при благоприятных условиях.

Некоторые данные о зависимости угла потерь полистирольных конденсаторов от различных факторов приведены на рис. 31. Для незащищенного конденсатора может сказываться влияние влажности окружающего воздуха, как показано на рис. 31, а по данным Уорнера; кривая снята при 20°C и частоте 1 кгц ; емкость конденсатора не указана. Судя по данным вышеприведенного рис. 3, при длительном действии влажности, близкой к 100% , угол потерь полистирола, а следовательно, и полистирольного конденсатора может возрасти еще больше, чем показано на рис. 31, а; поэтому в производстве полистирольных конденсаторов для обеспечения малых значений $\operatorname{tg} \delta$ следует герметизировать конденсаторы, а перед герметизацией производить их сушку, так как остаточная влага даже в небольших количествах может вызывать увеличение потерь.

На рис. 31, б (также по данным Уорнера) показана зависимость угла потерь полистирольного конденсатора от температуры при относительной влажности воздуха, равной нулю; измерения также производились при частоте 1 кгц . В пределах изменения температуры от комнатной до верхнего рабочего значения ($60\text{—}70^\circ \text{C}$) приращение угла потерь относительно невелико: порядка двух раз. Эти данные соответствуют конденсатору с обкладками из фольги. Аналогичная зависимость для конденсатора с металлизированными обкладками, по данным Е. И. Михайловой и Н. В. Северюхиной, показана на рис. 31, в; здесь относительное изменение угла потерь при переходе от 20 к 60°C несколько больше, порядка трех раз; абсолютные значения также увеличены, очевидно, за счет влияния увеличенного сопротивления обкладок.

Особенно сильно сказывается сопротивление обкладок полистирольного конденсатора на характере частотной зависимости угла потерь; на рис. 31, г показано, что снижение сопротивления обкладок при переходе от намотки со скрытой фольгой (А) к намотке с выступающей фольгой (В) дает резкое снижение угла потерь в области высоких частот; эти данные получены на конденсаторах емкостью $0,01 \text{ мкф}$ М. М. Асниным.

Попытаемся количественно учесть влияние сопротивления обкладок на величину угла потерь полистирольного конденсатора при различных вариантах конструкции секции. Для этой цели найдем значение сопротивления, эквивалентного потерям в обкладках, применительно к какому-нибудь заданному номиналу емкости. Предположим, что конденсатор имеет емкость $0,01 \text{ мкф}$ при толщине диэлектрика $d = 2 \times 20 = 40 \text{ мм}$; зададимся шириной пленки 25 мм и шириной обкладки (активной) $b = 20 \text{ мм}$. Принимая $\epsilon = 2,5$, легко находим, что длина обкладки в таком конденсаторе будет равна $L = 450 \text{ мм}$. Толщину алюминиевой фольги (обкладок) принимаем $d_0 = 7 \text{ мк}$.

В случае намотки со скрытой фольгой при выводных контактах, вставленных в середине намотки, сопротивление, эквивалентное потерям в обкладках, будет равно:

$$r_1 = \frac{1}{6} \cdot \frac{L}{bd_0} \rho = \frac{1}{6} \cdot \frac{45}{2 \cdot 7 \cdot 10^{-4}} \cdot 3 \cdot 10^{-6} = 1,6 \cdot 10^{-2} \text{ ом}; \quad (12)$$

здесь удельное сопротивление алюминия принято равным $\rho = 3 \cdot 10^{-6} \text{ ом} \cdot \text{см}$.

В случае намотки с выступающей фольгой при той же активной ширине фольги и закране $\Delta b = 2,5$ мм получаем:

$$r_2 = 2 \cdot \frac{\Delta b + \frac{b}{3}}{L d_0} \rho = \frac{2 \cdot \left(0,25 + \frac{2}{3}\right) 3 \cdot 10^{-6}}{45 \cdot 7 \cdot 10^{-4}} = 1,74 \cdot 10^{-4} \text{ ом.} \quad (13)$$

В случае конденсатора с металлизированными обкладками имеем:

$$r_3 = 2 \cdot \frac{\Delta b + \frac{b}{3}}{L} \cdot r_0 = \frac{2 \cdot \left(0,25 + \frac{2}{3}\right) 2}{45} = 0,81 \text{ ом.} \quad (14)$$

Здесь величина r_0 соответствует сопротивлению проводящего слоя на поверхности пленки, измеренному на участке, имеющем форму квадрата. По данным Е. И. Михайловой и Н. В. Северюхиной, величина, обратная r_0 , т. е. проводимость слоя, рассчитанная на квадратный участок поверхности, колеблется в пределах $0,4-0,7 \text{ ом}^{-1}$; при вычислении r_0 использовано среднее значение проводимости $0,5 \text{ ом}^{-1}$, которому соответствует величина $r_0 = 2 \text{ ом}$.

При последовательной эквивалентной схеме для конденсатора с потерями, при активном сопротивлении r , емкости C и угловой частоте ω величина тангенса угла потерь, как известно, будет равна:

$$\operatorname{tg} \delta = \omega C r. \quad (15)$$

Иными словами, при заданном значении r величина $\operatorname{tg} \delta$ будет увеличиваться не только с ростом частоты, но и с увеличением номинальной емкости конденсатора. Это наглядно показывают кривые на рис. 31, δ -ж (рис. 31, δ приведен для итальянских конденсаторов с обкладками из фольги, по данным Дзанобетти; рис. 31, e — аналогичные данные по каталогу итальянской фирмы «Икар»; рис. 31, $ж$ — данные французской фирмы: A — намотка со скрытой фольгой, B — намотка с выступающей фольгой; на всех этих рисунках цифры возле кривых указывают значение емкости в микрофарадах).

Используя полученные выше значения r_1 , r_2 и r_3 , получаем значения составляющей $\operatorname{tg} \delta$, соответствующей потерям в обкладках, при емкости $0,01 \text{ мкф}$ и разных значениях частоты: результаты расчета приведены в табл. 2. Данные этой таблицы показывают, что потери в обкладках делаются соизмеримыми с потерями в диэлектрике ($\operatorname{tg} \delta \approx 1 \div 2 \cdot 10^{-4}$) уже при частоте порядка 10^4 для случая металлизации и при частоте порядка 10^6 для случая обычной намотки (со скрытой фольгой); при выступающей фольге потери в обкладках близки к потерям в диэлектрике только при частоте порядка 10^8 .

Таблица 2

Расчетные значения составляющей $\operatorname{tg} \delta$, соответствующей потерям в обкладках, для конденсаторов емкостью $0,01 \text{ мкф}$ разной конструкции, при разных значениях угловой частоты

Тип конструкции	Угловая частота			
	10^2	10^4	10^6	10^8
Скрытая фольга	$1,6 \cdot 10^{-8}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$
Выступающая фольга	$1,7 \cdot 10^{-10}$	$1,7 \cdot 10^{-8}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$
Металлизация	$0,8 \cdot 10^{-6}$	$0,8 \cdot 10^{-4}$	$0,8 \cdot 10^{-2}$	$0,8 \cdot 10^0$

Табл. 2 получена для емкости $0,01 \text{ мкф}$; при более высоких значениях емкости потери в обкладках сближаются с потерями в диэлектрике при соответственно сниженных значениях частоты.

Наглядно видно резкое увеличение потерь в обкладках в случае металлизации: это является одним из возражений против применения металлизации в производстве полистирольных конденсаторов, рассчитанных на работу в области высоких частот.

Следует иметь в виду, что приведенные здесь данные соответствуют обычно применяемой металлизации цинком, имеющим относительно высокое удельное сопротивление (порядка $6 \text{ мком} \cdot \text{см}$); при освоении металлизации алюминием (удельное сопротивление порядка $2,8 \text{ мком} \cdot \text{см}$) верхний предел рабочей частоты для металлизированных конденсаторов может быть несколько повышен в соответствии с уменьшением сопротивления обкладок.

Сравним расчетные кривые с данными опыта, используя значения $\text{tg } \delta$, соответствующие емкости $0,01 \text{ мкф}$ на рис. 31. Для удобства найдем расчетные значения при частоте 10^6 гц , которой соответствует значение $\omega = 6,28 \cdot 10^6$. Получаем для случая скрытой фольги $10 \cdot 10^{-4}$ и для выступающей фольги — порядка $0,1 \cdot 10^{-4}$. Опытные данные для намотки со скрытой фольгой: $18 \cdot 10^{-4}$ (по рис. 31, $г$ — кривая A) и $32 \cdot 10^{-4}$ (по рис. 31, $ж$ — кривая A); для намотки с выступающей фольгой: $8 \cdot 10^{-4}$ (по рис. 31, $г$ — кривая B) и $3 \cdot 10^{-4}$ (по рис. 31, $ж$ — кривая B). На рис. 31, $д$ и $е$ при емкости $0,01 \text{ мкф}$ и частоте 10^6 гц находим значения: $3 \cdot 10^{-4}$ и $2,5 \cdot 10^{-4}$; очевидно, что эти данные должны соответствовать намотке с выступающей фольгой.

Сделанное здесь сопоставление достаточно грубо потому, что мы не знаем значения активной ширины фольги для опытных данных (соответственно мы не знаем также и точного значения толщины диэлектрика, что может повлиять на длину обкладки). Тем не менее даже такое грубое сопоставление данных расчета и опыта показывает, что при данной емкости и частоте 1 Мгц намотка с выступающей фольгой дает величину угла потерь такого порядка, который примерно соответствует чисто диэлектрическим потерям, тогда как намотка со скрытой фольгой дает резкое преобладание металлических потерь. Возможно, что значительное превышение опытных данных над расчетными при этом виде намотки обусловлено не только расхождением в размерах обкладки при равном значении емкости, но также и тем, что по расчету мы учли только потери в обкладках, а опыт учитывает сверх того как потери в диэлектрике, так и дополнительные потери в металле (в выводах, в переходных контактах от выводов к обкладкам и т. п.).

Таким образом, значение $\text{tg } \delta$ полистирольного конденсатора может меняться в широких пределах при изменении его номинальной емкости и частоты. Это учитывается в германских нормах на $\text{tg } \delta$ для конденсаторов данного типа, как показывает табл. 3.

Таблица 3

Нормы на величину тангенса угла потерь для полистирольных конденсаторов (Технические условия фирмы «Сименс», 1941 г.)

Частота, гц	Тангенс угла потерь		
	до $0,01 \text{ мкф}$	$0,01 - 0,1 \text{ мкф}$	$0,1 - 1 \text{ мкф}$
800	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$
50 000	$5 \cdot 10^{-4}$	$10 \cdot 10^{-4}$	—
1 000 000	$10 \cdot 10^{-4}$	—	—

По чехословацким нормам для полистирольных конденсаторов открытого типа указываются значения $\operatorname{tg} \delta_{\text{макс}}$: при емкостях до $47 \text{ нф} — 15 \cdot 10^{-4}$, при $47 — 560 \text{ нф} — 10 \cdot 10^{-4}$ и при более высоких емкостях — $15 \cdot 10^{-4}$. Таким образом, эти нормы предусматривают возможность возрастания угла потерь также и при очень малых емкостях за счет влияния паразитной емкости защитной оболочки (поверхностных загрязнений).

В. Сопротивление изоляции и постоянная времени

Высокое удельное сопротивление полистирола дает возможность изготавливать из него конденсаторы с исключительно высоким сопротивлением изоляции (высокой постоянной времени), необычной для конденсаторов иных типов; для полистирольных конденсаторов удается достигать значений порядка $10^6 \text{ ом} \cdot \text{ф}$ и даже выше.

Это требует, однако, применения особо тщательной технологии, а потому в производстве обычных типов полистирольных конденсаторов, от которых столь высокие значения постоянной времени не требуются даже при использовании герметизации, наши нормы обычно гарантируют значение не менее $10\,000 \text{ ом} \cdot \text{ф}$ (то же, что $\text{Мом} \cdot \text{мкф}$ или сек). Следует отметить, что для лучших бумажных конденсаторов гарантируется норма $2000 \text{ ом} \cdot \text{ф}$. Для полистирольных конденсаторов малой емкости указывается не постоянная времени, а сопротивление изоляции, обычно не ниже $100\,000 \text{ Мом}$ (при емкостях ниже $0,1 \text{ мкф}$); для некоторых открытых типов — не ниже $10\,000 \text{ Мом}$. Эти цифры соответствуют температуре 20°С , а при верхнем рабочем пределе температуры ($60—70^\circ \text{С}$) норма на сопротивление изоляции (или постоянную времени) снижается в 2 раза.

В рекламных сообщениях зарубежных фирм часто указываются более высокие значения: постоянная времени порядка $10^5—10^6 \text{ ом} \cdot \text{ф}$ и сопротивление изоляции порядка 10^6 Мом ; однако эти значения обычно не являются браковочными нормами. Впрочем в каталоге итальянской фирмы Дукати значение 10^6 Мом указывается как нижний допустимый предел сопротивления изоляции при 20°С и влажности не свыше 70% (измерение с выдержкой под напряжением 60 сек при напряжении 100 в , если рабочее напряжение менее или равно 500 в и при напряжении 500 в для более высоких рабочих значений).

Зависимость постоянной времени полистирольных конденсаторов от температуры характеризуется кривыми на рис. 32, *а* и *б*. На рис. 32, *а* кривые 1, 2 и 3 получены для конденсаторов с обкладками из фольги (соответственно: 1 — по данным Дзанобетти, 2 — по данным Козенса и 3 — по данным французской фирмы ЛТТ), а кривая 4 — для металлизированных конденсаторов (по данным Е. И. Михайловой и Н. В. Северюхиной). Легко заметить резкое понижение постоянной времени при переходе от фольговых обкладок к металлизации. Следует, впрочем, иметь в виду, что здесь могли также повлиять различия в условиях испытания, в качестве

пленки и в режимах технологии, так как, например, Делла Джiovanni указывает значительно более высокую постоянную времени для металлизированного полистирола: $3 \cdot 10^6 \text{ ом} \cdot \phi$ при 20°C и $7 \cdot 10^5 \text{ ом} \cdot \phi$ при 80°C .

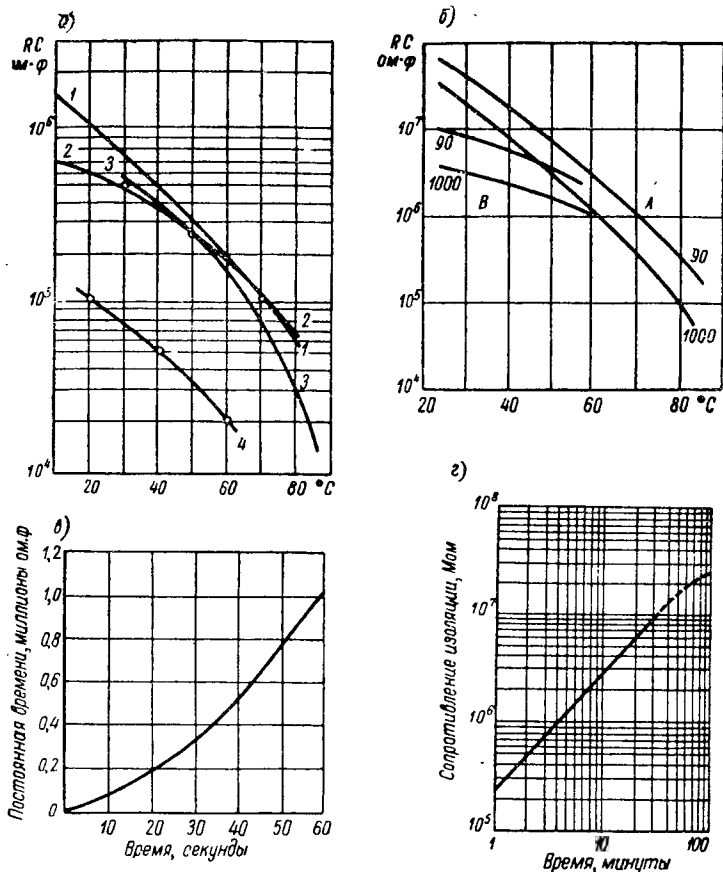


Рис. 32. Зависимость постоянной времени и сопротивления изоляции полистирольных конденсаторов от действия некоторых факторов:

а — влияние температуры на постоянную времени.
 1, 2 и 3 — конденсаторы с обкладками из фольги; 4 — металлизированный конденсатор;
 б — влияние напряжения при измерении на температурную зависимость постоянной времени.
 А — незащищенные секции; В — секции в стеклянных трубках; цифры у кривых — напряжение в вольтах;
 в — зависимость постоянной времени от времени выдержки конденсатора под напряжением в пределах до 1 мин (при 20°C); г — зависимость сопротивления изоляции от времени выдержки под напряжением в пределах до 100 мин (комнатная температура).

Судя по кривым на рис. 32, а, зависимость $\lg RC = f(t)$ довольно сильно отклоняется от прямолинейной в отличие от того, что мы имеем для бумажных конденсаторов. В первом приближении эту

зависимость для кривых 2 и 3 можно заменить двумя прямыми: для области низких температур с коэффициентом наклона $\beta \approx 0,01 \div 0,015$ и для области высоких температур с коэффициентом $\beta \approx 0,025 \div 0,03$. Для кривой 1, которая меньше отклоняется от прямой линии, можно принять усредненное значение $\beta = 0,02$.

Причину различия в наклоне кривой $\lg RC = f(t)$ в различных областях температуры можно объяснить, используя данные Мистича, показанные на рис. 32, б: кривые А получены им для незащищенных полистирольных секций, а кривые В — для таких же секций в корпусах из стекла пирекс. Для кривых А среднее значение $\beta = 0,03$, а для кривых В — равное 0,01, характерно для неорганических материалов, которые обычно несколько меньше изменяют удельное сопротивление при нагревании, чем органические материалы. Можно полагать, что на рис. 32, а кривые 2 и 3 сняты для герметизированных конденсаторов (в керамических или стеклянных трубках или в металлических корпусах с керамическими или стеклянными изоляторами); в этом случае при низких температурах сопротивление полистирола очень велико, и сопротивление изоляции конденсатора определяется не внутренней, а внешней поверхностной утечкой по неорганической изоляции, входящей в систему герметизации.

Цифры у кривых на рис. 32, б обозначают величину напряжения (в вольтах), при котором производились измерения; переход от 90 в к 1000 в дает заметное снижение постоянной времени, порядка 2—3 раз.

Влияние времени выдержки под напряжением на величину постоянной времени (и сопротивления изоляции) показано на рис. 32, в и г (соответственно, по данным Козенса и Карлтона). Резкое возрастание происходит в течение первой минуты приложения напряжения (рис. 32, в), но сопротивление изоляции продолжает нарастать и далее, в течение десятков минут (рис. 32, г); по данным Дзанобетти, сопротивление изоляции продолжает расти и при дальнейшем увеличении времени выдержки: при переходе от 100 к 1000 мин он наблюдал возрастание $R_{из}$ на один порядок величины.

Судя по данным рис. 32, в и г, можно полагать, что кривые на рис. 32, а и б получены при обычном значении выдержки под напряжением, равным 1 мин.

Медленное нарастание сопротивления изоляции со временем, соответствующее медленному падению тока, протекающего через конденсатор, Карлтон объясняет падением в полистирольном конденсаторе, кроме явления быстрой электронной поляризации, также и некоторых замедленных поляризационных явлений. Возможно, что может в известной степени проявляться междупольная поляризация, если диэлектрик составлен из нескольких слоев пленки, которые полностью слились в одно целое в процессе запекания. Для проверки этого предположения следовало бы исследовать падение тока утечки в конденсаторе с двухсторонней металлизацией пленки. Может быть, явление медленного спада тока обусловлено также постепенным освобождением диэлектрика от свободных ионов («электрическая очистка»).

Малые значения тока утечки в полистирольных конденсаторах затрудняют измерение постоянной времени с помощью зеркально-гальванометра или других приборов, регистрирующих ток, протекающий через диэлектрик. Поэтому часто прибегают к использованию метода саморазряда для определения постоянной времени

конденсаторов этого типа. В этом случае вычисление постоянной времени производят по формуле:

$$RC = \frac{\tau \lg e}{\lg U_0 - \lg U_1}, \quad (16)$$

где U_0 — напряжение на конденсаторе в момент начала саморазряда, а

U_1 — напряжение по истечении времени τ сек.

Значение RC получаем в $\text{ом} \cdot \phi$ (или сек), если напряжение выражено в вольтах. Спадание напряжения на зажимах полистирольного конденсатора хорошего качества происходит весьма медленно, как показывает рис. 33, на котором приведены результаты весь-

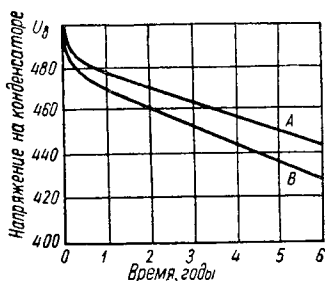


Рис. 33. Зависимость напряжения на зажимах двух идентичных полистирольных конденсаторов от времени в процессе длительного саморазряда.

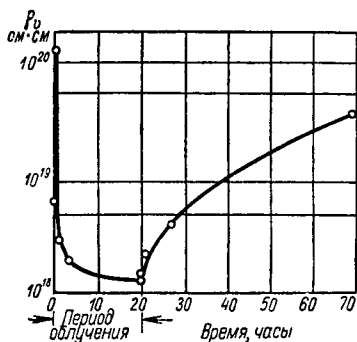


Рис. 34. Зависимость удельного объемного сопротивления полистирола от времени в период облучения и в последующий период отдыха.

ма длительных измерений, проведенных на двух однотипных конденсаторах A и B Козенсом. Значения, вычисленные по этим данным, составляют $1,5 \div 2 \cdot 10^9 \text{ ом} \cdot \phi$, или 46 и 66 лет! Судя по кривым рис. 33, процесс спадания напряжения замедляется по истечении первого года испытания; это показывает, что процесс возрастания сопротивления изоляции с течением времени протекает еще медленнее, чем можно было судить по тем данным, которые были приведены выше. Длительная выдержка полистирольного конденсатора под напряжением (конечно, не превышающем допустимое рабочее значение) должна приводить поэтому к резкому повышению его постоянной времени.

В связи с применением полистирольной пленки в производстве дозиметрических конденсаторов (§ 1) представляет интерес привести некоторые данные о влиянии ионизирующего излучения на сопротивление изоляции полистирольных конденсаторов. На рис. 34 приведены кривые, взятые из книги Хиппеля, об изменении удельного объемного сопротивления полистирола (определяющего величину сопротивления изоляции) при воздействии гамма-излучения,

с дозой 13 рентген в час в течение 20 ч, а также после удаления источника облучения. Резкое снижение удельного сопротивления от значения выше 10^{20} ом·см до величины порядка $2 \cdot 10^{18}$ ом·см произошло за первые 2 ч периода облучения; в последующее время облучения снижение происходило уже весьма медленно. После прекращения облучения началось постепенное восстановление удельного сопротивления, но даже за 70 ч первоначальное значение еще не было получено: величина порядка 10^{20} ом·см была достигнута только по истечении 92 ч от начала опыта.

Для связи между удельной электропроводностью диэлектриков и величиной интенсивности облучения было получено эмпирическое уравнение:

$$\sigma = \sigma_0 \left(\frac{I}{I_0} \right)^n. \quad (17)$$

Здесь σ — электропроводность, $\text{ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ при интенсивности облучения I , $\text{рентген} \cdot \text{ч}^{-1}$, а σ_0 — исходная электропроводность при исходной интенсивности облучения I_0 , существующей в окружающей среде; n — некоторая постоянная. Для полистирола были найдены значения: $\lg \sigma_0 = -22,8$ и $n = 0,71$, а для ориентированной полистирольной пленки (стирофлекс) $\lg \sigma_0 = -0,21$ и $n = 0,51$.

Заметное увеличение электропроводности полистирольной пленки при воздействии облучения и относительно медленное возвращение к исходному значению создают известные трудности при использовании этого материала для дозиметрических конденсаторов.

Г. Коэффициент абсорбции

Если зарядить конденсатор некоторым напряжением U в течение времени τ_1 , затем закоротить его выводы на небольшое время τ_2 и попытаться измерить напряжение на конденсаторе через время τ_3 после устранения короткого замыкания, то для конденсаторов с твердым диэлектриком обычно удастся зарегистрировать некоторое значение напряжения ΔU , появившееся на выводах конденсатора. Это напряжение обычно называют напряжением остаточного заряда, сохраняющегося в диэлектрике конденсатора при кратковременном замыкании его обкладок накоротко. Явление образования в диэлектрике таких остаточных зарядов называют абсорбцией заряда. Это явление вносит известные неудобства в ряде случаев использования конденсаторов в электронизмерительной технике, в счетно-решающих устройствах и других областях техники, а потому желательно давать ему количественную оценку и стремиться свести его к минимуму.

Качество конденсаторов можно оценивать по величине коэффициента абсорбции k_a , представляющего отношение напряжения остаточного заряда ΔU к зарядному напряжению U ; величина k_a выражается в процентах. Большим преимуществом полистирольных конденсаторов является свойственное им малое значение коэффициента абсорбции, чем они выгодно отличаются не только от

бумажных или слюдяных конденсаторов, но и от большинства других типов пленочных конденсаторов.

В практике конденсаторостроения коэффициент абсорбции является относительно новой характеристикой качества, а потому многие фирмы, в частности западноевропейские, не указывают в каталогах и рекламных данных значений k_a ; в США большинство фирм за последние годы начало проводить измерение коэффициента абсорбции и указывать его величину в рекламных данных.

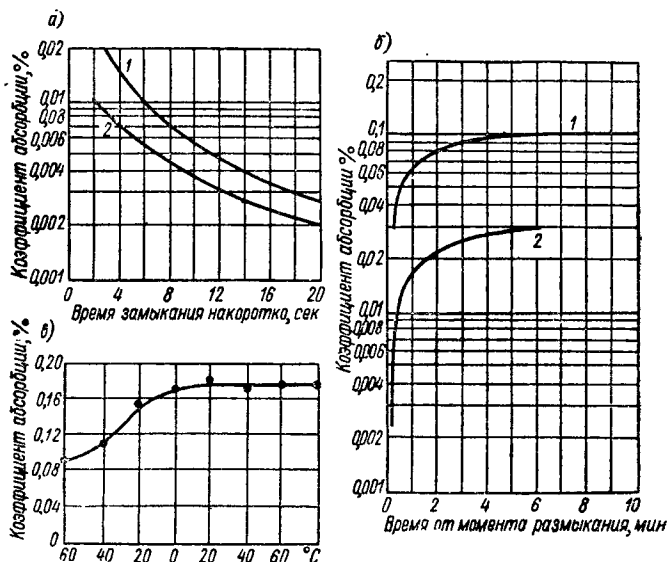


Рис 35. Зависимость коэффициента абсорбции полистирольных конденсаторов от условий испытания:

а — влияние времени замыкания накоротко при двух значениях времени заряда (1—1 мин, 2—0,5 мин) и времени от момента размыкания 0,5 мин; б — влияние времени от момента размыкания при двух значениях времени заряда (1—10 мин, 2—5 мин) и времени замыкания накоротко 2 сек; в — изменение коэффициента абсорбции в широком интервале температур.

Для полистирольных конденсаторов приводятся значения k_a порядка 0,05%, 0,02% и даже 0,015%. (Для бумажных конденсаторов в американской литературе обычно приводятся значения выше 1%, а для слюдяных — порядка десятых процента; по отечественным данным для некоторых типов слюдяных конденсаторов величина k_a может быть выше, чем у бумажных, и достигать значений до 2—5%).

Необходимо иметь в виду, что величина коэффициента абсорбции сильно зависит от условий испытания, в первую очередь от значений времени: τ_1 , τ_2 и τ_3 ; поэтому данная характеристика носит условный характер и требует точной фиксации условий опыта для получения воспроизводимых результатов. Некоторые данные по этому вопросу приведены на рис. 35.

Кривые 1 (по данным Мистича) и 2 (по данным Матесона и Калдекорта) на рис. 35, а, полученные при измерении ΔU через 30 сек после размыкания при двух значениях времени заряда ($1 - \tau_1 = 60$ сек, $2 - \tau_1 = 30$ сек) показывают сильную зависимость коэффициента абсорбции от времени замыкания накоротко. Чаще всего это время принимается равным 2 сек. На рис. 35, б, по данным Мистича, приведены кривые зависимости k_a от значения времени τ_3 при двух значениях времени заряда τ_2 ($1 - 10$ мин и $2 - 5$ мин); эти данные показывают, что по истечении 5—6 мин с момента устранения короткого замыкания достигается установившееся значение коэффициента абсорбции, сильно зависящее от времени заряда (при заданном значении времени замыкания накоротко).

На рис. 35, в, по данным Думмера, показана зависимость k_a от температуры; опыт проводился при значениях времени $\tau_1 = 1$ мсек, $\tau_2 = 1$ мин, $\tau_3 = 1$ мин. В области положительных температур k_a сохраняет практически постоянное значение, но заметно снижается при сильном охлаждении. Следует отметить, что в сопоставлении с рис. 35, а и б, абсолютные значения k_a на рис. 35, в представляются завышенными, если учесть, что время заряда в данном случае мало, а время закорачивания относительно велико.

В отечественном каталоге на пленочные конденсаторы величина коэффициента абсорбции не оговаривается для обычных типов полистирольных конденсаторов. Для конденсаторов типа МПГТ, предназначенных для счетно-решающих устройств, оговаривается, что остаточное напряжение на выводах конденсаторов, заряженных до напряжений 200—250 в, после замыкания накоротко в течение 2 сек должно быть не более 5 в. Это дает значение порядка 2—2,5%, что сильно завышено в сравнении с приведенными выше данными. Впрочем надо иметь в виду, что в данном случае не оговорены значения времени заряда и времени с момента устранения короткого замыкания до измерения ΔU ; поэтому известный запас при установлении допустимого значения k_a при такой неопределенности условий испытания можно считать необходимым. В связи с уточнением условий испытания можно ожидать пересмотра нормы в ближайшее время и снижения допускаемых значений k_a . Предполагается ввести испытание при значениях времени τ_1 до полного заряда, $\tau_2 = 5$ сек и $\tau_3 = 3$ мин; в этих условиях для отечественных полистирольных конденсаторов значения k_a обычно колеблются в пределах от 0,03 до 0,1%.

Д. Электрическая прочность и допускаемое рабочее напряжение

Выше отмечалось, что средние значения кратковременной электрической прочности полистирольной пленки весьма велики. Внутренняя электрическая прочность (прочность при чисто электрическом пробое, когда влияние краевых разрядов устранено, а пробой протекает за краткий промежуток времени), по данным английских исследователей, может превышать 600 кВ/мм. Кривые рис. 5, б показывают, что для пленок толщиной 10—30 мк при быстром воздействии постоянного напряжения можно получать пробивную напряженность (при вероятности пробоя 50%) в пределах 200—300 кВ/мм.

Эти данные соответствуют электродам малой площади (диаметр 10 мм); переход к увеличенной площади электродов (площади обкладок) в конденсаторах относительно большой емкости

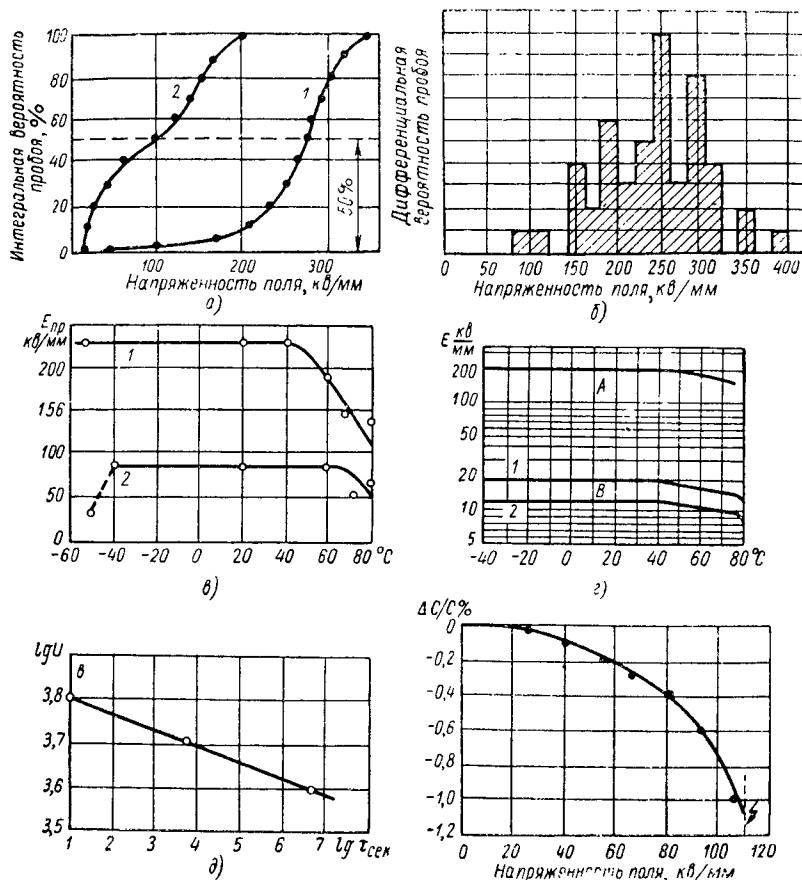


Рис. 36. Электрическая прочность полистирольных конденсаторов. а — интегральная вероятность пробоя в функции от напряженности электрического поля. 1 — для образцов пленки (электроды диаметром 10 мм); 2 — для конденсаторов (площадь обкладок 2000 см²); б — дифференциальная вероятность пробоя в функции от напряженности электрического поля для конденсаторов с площадью обкладок 1400 см²; в — зависимость пробивной напряженности конденсаторов емкостью 0,1 мкф от температуры. 1 — незапеченные, 2 — запеченные образцы.

г — зависимость электрической прочности от температуры. А — кратковременная пробивная напряженность; В — допускаемая рабочая напряженность; 1 — трехслойные, 2 — двухслойные конденсаторы. д — зависимость пробивного напряжения полистирольных конденсаторов (постоянный ток) от времени выдержки; е — зависимость емкости металлизированного полистирольного конденсатора от напряженности поля: напряженность поля увеличивалась ступенями по 16,7 кВ/мм с выдержкой 5 мин на каждой ступени; стрелка показывает установление короткого замыкания между обкладками («окончательного» пробоя).

дает заметное снижение кратковременной электрической прочности, как показано на рис. 36, *а*, по данным Е. И. Михайловой и Я. Я. Черняк. В этом случае кривая 2 получена для конденсаторов 0,1 мкф с диэлектриком 2×20 мк и с площадью обкладок порядка 2000 см². Значение $E_{пр}$, соответствующее 50% пробоев, снизилось, при переходе от кривой 1 к кривой 2, от 275 кВ/мм до 100 кВ/мм, причем резко возросло количество пробоев при значениях напряженности менее 50 кВ/мм.

По данным Карлтона, при соблюдении условий высокой чистоты на производстве можно получать и при относительно больших площадях обкладок высокие значения $E_{пр}$, как показывает гистограмма распределения пробивных напряженностей на рис. 36, *б*; здесь среднее значение $E_{пр}$ составило около 250 кВ/мм при площади обкладок 1400 см² и суммарной толщине диэлектрика 25 мк (вероятно, 2 слоя по 12,5 мк).

Можно, однако, думать, что повышенные значения $E_{пр}$ на рис. 36, *б* обусловлены не только тщательностью технологии, но и тем, что эти данные получены для незапеченных или слабо запеченных секций. По данным А. П. Бутра, показанным на рис. 36, *в*, в результате запекания средние значения $E_{пр}$ могут снизиться более чем в два раза; эти данные получены при постоянном напряжении для секций емкостью 0,1 мкф. Резкое снижение электрической прочности в процессе запекания могут вызвать следы жира (см. рис. 7 и 8), которые дают особенно быстрое местное разрушение пленки при повышенной температуре; может также сказываться сближение краев обкладок противоположного знака при продавливании размягченного полистирола жесткой фольгой; наконец могут сказываться механические напряжения, возникающие в витках пленки при сокращении ее длины в процессе запекания, как было показано А. П. Бутра. Эта же причина, очевидно, привела к снижению электрической прочности запеченных образцов в области низких температур на кривой 2 рис. 36, *в*. При температурах выше 40—60°С, как показывает этот рисунок, также наблюдается снижение электрической прочности полистирольных конденсаторов. Это подтверждается данными Дзанобетти (кривая А на рис. 36, *г*). По этим же данным допустимое значение рабочей напряженности снижается для итальянских полистирольных конденсаторов, начиная с 40°С (кривые В); по данным фирмы Икар при 60°С номинальное рабочее напряжение составляет 85% от его значения при 40°С, а при 80°С — не более 70%. В наших нормах допустимое рабочее напряжение сохраняется неизменным вплоть до верхнего предела рабочей температуры (60—70°С).

При постоянном напряжении и нормальной температуре электрическая прочность полистирольных конденсаторов мало зависит от времени воздействия напряжения, как было показано Е. И. Михайловой и Я. Я. Черняк (рис. 36, *д*); полученная ими эмпирическая зависимость имела вид:

$$U = 6300\tau^{0,027}, \quad (18)$$

где U — пробивное напряжение, в, соответствующее пробую 50% образцов в испытуемой партии, а τ — время, сек.

Эти данные соответствуют двухслойным конденсаторам с обкладками из фольги.

Медленность старения при постоянном напряжении обусловлена в первую очередь тем, что механизм старения органической изоляции в этих условиях обычно носит электрохимический характер и связан с токами утечки, которые у полистирольных конденсаторов очень малы. Возможность проявления ионизационных явлений при постоянном напряжении также связана с величиной проводимости диэлектрика, позволяющей стекать зарядам, появляющимся на поверхности газовых включений при вспышке ионизации; высокое удельное сопротивление полистирола должно резко замедлять процесс стекания этих зарядов, что увеличивает интервал между вспышками и делает частоту вспышек при постоянном напряжении весьма малой.

Вместе с тем запас электрической прочности в полистирольных конденсаторах, т. е. отношение кратковременной пробивной напряженности $E_{пр}$ к допускаемому рабочему значению напряженности $E_{раб}$, берется относительно очень большим, даже больше, чем в бумажных конденсаторах, где старение изоляции и при постоянном напряжении происходит достаточно быстро. По данным рис. 36, $E_{пр}/E_{раб} = 10 \div 15$. Не меньшие значения запаса электрической прочности были установлены и в нашем конденсаторостроении при разработке полистирольных конденсаторов с обкладками из фольги. В соответствии с толщиной диэлектрика и емкостью (т. е. площадью обкладок) были выбраны значения $E_{раб}$, приведенные в табл. 4

Таблица 4

Испытательные и рабочие значения напряжения и напряженности поля для полистирольных конденсаторов с обкладками из фольги (1951 г.)

Номинальная емкость, мкф	Толщина диэлектрика, мм	Постоянное напряжение, в		Напряженность поля, кв/мм	
		испытательное	рабочее	$E_{ис}$	$E_{раб}$
0,1—2	2×0	500	250	12,5	6,25
0,003—0,1	2×20	1000	500	25,0	12,5
0,003—0,05	3×20	2000	1000	26,0	13,3

По отношению к средней кратковременной электрической прочности эти значения дают запас прочности не менее 10—20 раз.

Необходимость установления таких запасов прочности связана в данном случае не с опасением быстрого старения диэлектрика, а с наличием больших разбросов электрической прочности по отношению к средним значениям. Эти разбросы заставляют ориентироваться на нижний предел электрической прочности, который обычно не превышает 50 кв/мм; при этом запас по отношению к ис-

пытательному значению: $E_{пр}/E_{пс}$ уже оказывается только порядка 2. Поскольку разброс прочности особенно велик при большой площади обкладок, для больших номинальных емкостей при том же значении толщины диэлектрика приходится добавочно снижать величину $E_{раб}$.

Применение металлизации пленки ослабляет опасность случайного пробоя благодаря эффекту «самовосстановления» и позволяет повысить $E_{раб}$ полистирольного конденсатора до значений порядка 20 кВ/мм при небольших емкостях и до 12—13 кВ/мм при больших емкостях, т. е. примерно в 2 раза в сравнении со случаем применения обкладок из фольги. При этом сказывается возможным для ряда типов конденсаторов применять один слой пленки при достаточно высоких рабочих напряжениях, порядка сотен вольт.

Следует иметь в виду, что свойство самовосстановления при пробое не означает, что рабочее напряжение металлизированного полистирольного конденсатора может быть неограниченно повышено. Когда прикладываемое к нему напряжение превышает известный предел, то начинают происходить систематические пробои, сменяющиеся восстановлением электрической прочности; число таких пробоев в единицу времени возрастает с увеличением напряжения. При каждом пробое в процессе самовосстановления разрушается небольшая часть обкладки, непосредственно прилегающая к месту пробоя; поэтому с повышением напряжения будет наблюдаться постепенное снижение емкости полистирольного металлизированного конденсатора (рис. 36, е). При этом наблюдается также повышение угла потерь. В случае металло-бумажного конденсатора, увеличивая напряжение, можно прийти к полной потере емкости («обрыв»); в случае полистирольного металлизированного конденсатора, после того как емкость снизится на 1—1,5%, обычно происходит короткое замыкание обкладок, т. е. пробой конденсатора. По данным Е. И. Михайловой и Н. В. Северюхиной, при одном слое пленки 20 мк пробивное напряжение металло-пленочных конденсаторов равно 1500—3000 в, а при одном слое 30 мк или двух слоях по 20 мк оно равно 2800—5000 в.

Возможность короткого замыкания обкладок после известного числа пробоев, сменявшихся восстановлением прочности, обусловлена тем, что в местах восстановления прочности происходит частичная порча диэлектрика (механические повреждения, науглероживание и т. п.). Если несколько повторных пробоев произойдут в одном и том же месте, то в итоге может создаться проводящий путь между обкладками.

В СССР металлизированные полистирольные конденсаторы изготавливаются как однослойные на рабочее напряжение 160, 250, 400 и 600 в (типы МПО и МПГО), так и многослойные (2—3 слоя пленки) на 250, 500 и 1000 в (тип МПГ). Испытательное напряжение для первых принято 1,5 $U_{ном}$ и для вторых 2 $U_{ном}$. Конденсаторы с обкладками из фольги изготавливаются только небольших емкостей (до 0,01—0,03 мкФ) с рабочим напряжением 300—500 в (типы ПО и ПСО).

При изготовлении конденсаторов с обкладками из фольги обычно применяют не менее двух слоев пленки между обкладками, для того чтобы обеспечить перекрытие слабых мест в одном слое здоровыми участками второго слоя. Однако в практике некоторых фирм известно было применение одного слоя пленки при небольших емкостях и малых напряжениях (32 в).

Таблица 5

Испытательные и рабочие напряжения полистирольных конденсаторов по данным французской фирмы (обкладки из фольги)

Испытательное напряжение, в		Допускаемое рабочее напряжение, в	
при цеховых испытаниях	при приемно-сдаточных испытаниях	Обычная надежность	Высокая надежность
200	125	50	25
750	500	250	125
1500	1000	500	250

По данным французской практики, при изготовлении полистирольных конденсаторов с обкладками из фольги применяют значения рабочих и испытательных напряжений, указанные в табл. 5. Отмечается, что напряжение, принятое для цеховых испытаний, может быть приложено к конденсатору только однократно.

Зависимость объема французских конденсаторов при указанных значениях напряжения от номинальной емкости показано на рис. 37 в виде сплошных линий без точек. Пунктирные линии с точками соответствуют отечественным данным. Французские конденсаторы с наименьшим объемом (напряжение высокой надежности 25 в фольговые, возможно, однослойные) соответствуют нашим однослойным металлизированным конденсаторам на 600 в. Отечественные фольговые конденсаторы на рабочее напряжение 300 в примерно эквивалентны по объему французским конденсаторам с напряжением высокой надежности 250 в.

Эти значения напряжений соответствуют работе при постоянном токе. При переменном токе напряжение должно быть снижено, чтобы предотвратить возможность развития ионизации

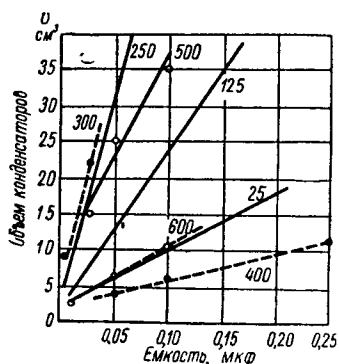


Рис. 37. Зависимость объема полистирольных конденсаторов с различным рабочим напряжением от номинальной емкости. Цифры у кривых указывают рабочее напряжение: сплошные кривые — французские данные (напряжение высокой надежности); пунктир — отечественные данные; 300 — фольговые конденсаторы, 500 — тип МПГ, 400 и 600 — тип МПО и МПГО.

или разогрева конденсатора потерями энергии. Значения переменного напряжения, допускаемые по отечественным нормам для конденсаторов типов МПГ и МПГО, приведены в табл. 6.

Таблица 6

Значения допускаемого переменного напряжения для металлизированных полистирольных конденсаторов

Тип конденсатора	Номинальное напряжение постоянного тока, в	Частота, гц		
		до 500	свыше 500 до 10 ⁴	10 ⁴ —10 ⁶
		Амплитуда переменного напряжения, в		
МПГО, МПО .	160	100	20	—
МПГО, МПО .	250	200	50	—
МПГ	250	125	100	—
МПГО, МПО .	400	250	100	20
МПГ	500	250	100	50
МПГО, МПО .	600	250	100	20
МПГ	1000	250	100	50

Для фольговых конденсаторов типов ПО и ПОС оговаривается только рабочее напряжение постоянного тока. Для малогабаритных конденсаторов малой емкости типа ПМ оговаривается рабочее напряжение постоянного тока или амплитудное напряжение переменного тока не свыше 60 в. Зарубежные фирмы обычно не оговаривают допустимого переменного напряжения для обычных типов полистирольных конденсаторов, предназначенных для работы в радиоприемной или телевизионной аппаратуре.

§ 5. Полистирольные конденсаторы с повышенным напряжением и с повышенной реактивной мощностью

При изготовлении полистирольного конденсатора с высоким рабочим напряжением постоянного тока, как отмечалось выше, можно не опасаться интенсивного развития ионизации и усиленного электрохимического старения и получать надежную работу конденсатора простым подбором толщины диэлектрика, обеспечивающим нужный запас электрической прочности по отношению к пробое при кратковременном воздействии напряжения, с учетом небольшого снижения $E_{пр}$ с течением времени.

Конденсаторы такого типа — открытой конструкции с малыми значениями номинальной емкости — находят себе применение в современной электронной технике, в частности в телевизионных устройствах.

В СССР изготавливаются конденсаторы типа ПОВ с номинальной емкостью $390 \text{ нф} \pm 20\%$ на номинальное рабочее напряжение 10 и 15 кВ постоянного тока; испытательное напряжение равно, соответственно, 15 и 25 кВ; интервал рабочей температуры для таких конденсаторов: от 0 до 60°С (допускается периодическая работа в течение не более 4 ч при 70°С). Объем этих конденсаторов 12,5 и 14 см³, вес 12 и 18 г.

Предприятие «Тесла» (ЧССР) выпускает целую серию подобных конденсаторов (рис. 38) со следующими значениями номинальных рабочих и испытательных напряжений постоянного тока: 1/2,5, 3/7,5, 5/12,5 и 10/55 кВ (знаменатель дроби $U_{ис}$, а числитель $U_{раб}$). Номинальная емкость конденсаторов от 10 пф до 0,01 мкф при наименьшем и до 0,001 мкф при наибольшем рабочем напряжении. Конденсатор на 10 кВ и 500 пф имеет объем 11,3 см³ и вес 13 г, т. е. близок к нашему конденсатору 10 кВ и 390 пф. Допуск по емкости: ± 20 и $\pm 10\%$; рабочий интервал температур: от -20 до $+60^\circ\text{C}$. Норма на сопротивление изоляции — не ниже 200 000 Мом при 20°C .

При переходе к переменному напряжению, даже низкой частоты, при повышенных значениях напряжения возникает опасность появления ионизационных процессов. При этом повышение толщины диэлектрика не позволяет решить задачу обеспечения надежной

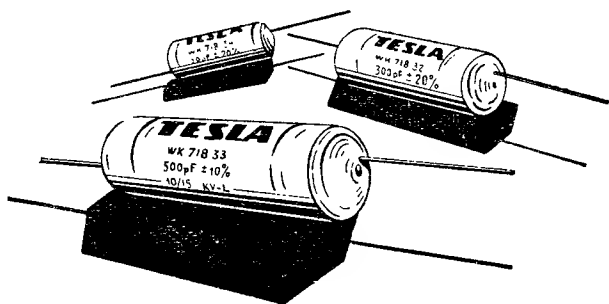


Рис. 38. Чехословацкие полистирольные конденсаторы малой емкости с рабочим напряжением постоянного тока от 1 до 10 кВ.

работы конденсатора при повышенном напряжении, так как напряжение начала ионизации весьма мало увеличивается с ростом толщины. Так, по данным А. П. Бутра, при увеличении толщины от $2 \times 20 = 40$ мк до $3 \times 20 = 60$ мк напряжение начала ионизации при частоте 50 Гц, найденное с помощью установки для обнаружения появления высокочастотных разрядов, изменилось лишь от 410—440 в до 420—470 в; это соответствует снижению соответствующих значений напряженности поля от 10,2—10,7 кВ/мм до 7—7,8 кВ/мм. Такие же значения напряжения начала ионизации были установлены при визуальном наблюдении за появлением свечения внутри конденсатора (помещенного в затемненную камеру), но при частоте 2000 Гц; при частоте 50 Гц интенсивность ионизации падает, свечение ослабевает и визуальный метод дает повышение регистрируемых значений ионизирующего напряжения на 25—35 в.

Следует иметь в виду, что процесс запекания, приводящий к вытеснению воздуха из зазоров между пленкой и фольгой в полистирольном конденсаторе, дает снижение интенсивности ионизации, но не позволяет существенно повысить напряжения начала ионизации. Указанные выше цифры были получены как на запеченных, так и на незапеченных образцах.

Известно, что о начале ионизации можно также судить по перегибу кривой зависимости $\text{tg} \delta = f(U)$ от напряжения: такие кривые

для незапеченной секции (1) и такой же секции, прошедшей процесс запекания (2), показаны на рис. 39, а; запекание не дает существенного изменения места перегиба кривой, хотя и снижает ее рост после перегиба в соответствии с уменьшением содержания остаточного воздуха в секции и ослаблением интенсивности ионизации.

Судя по кривым на рис. 39, а, ионизация также начинается при напряжениях, превышающих 400 в; однако из предосторожности на отдельные секции полистирольных конденсаторов, независимо от толщины диэлектрика, допускают переменное напряжение не выше

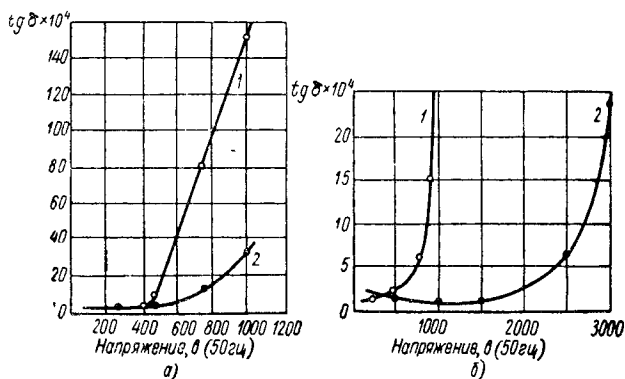


Рис. 39. Зависимость угла потерь секций полистирольных конденсаторов от напряжения при частоте 50 гц:

а — влияние запекания.
1 — незапеченный; 2 — запеченный образец;
б — влияние пропитки маслом.
1 — до пропитки; 2 — после пропитки.

250 в (эфф.) (см. табл. 6); это соответствует амплитуде $250 \cdot 1,41 = 352$ в, что составляет значение минимального пробивного напряжения воздуха; очевидно, что в этом случае возможность ионизации принципиально исключается, поскольку возможность пробоя воздуха в остаточных воздушных включениях отпадает.

Если необходимо получить более высокие значения переменного напряжения, то при использовании непропитанных полистирольных конденсаторов приходится применять принцип последовательного соединения секций с таким расчетом, чтобы на каждую секцию приходилось напряжение не выше 250 в.

Существенное повышение ионизирующего напряжения может быть получено путем пропитки полистирольных конденсаторов, причем в этом случае, очевидно, необходимо брать незапеченные секции, чтобы обеспечить проникновение пропиточной массы в зазоры между слоями пленки и фольги. Рис. 39, б показывает изменение хода кривой $\text{tg } \delta = f(U)$ при частоте 50 гц для незапеченной полистирольной секции, емкостью 0,03 мкф с диэлектриком 30×30 мк, после ее пропитки под вакуумом хорошо очищенным нефтяным маслом. Перегиб кривой в данном случае сместился от напряже-

ния менее 500 в до напряжения порядка 1500 в; следует отметить, что увеличение потерь при напряжениях выше 1500 в в данном случае могло быть вызвано даже не началом ионизации, а влиянием некоторого разогрева конденсатора за счет потерь в обкладках и выводах, а также от нормальных диэлектрических потерь; проверка аналогичных пропитанных маслом конденсаторов при толщине диэлектрика 2×20 мк, проведенная на установке для определения появления высокочастотных разрядов, показала отсутствие ионизации вплоть до 2000 в (50 кВ/мм); на рис. 39, б напряжение 1500 в соответствует напряженности 16,7 кВ/мм.

Пропитка маслом была применена одной из зарубежных фирм при разработке образцовых полистирольных конденсаторов, для работы на частоте 50 гц, при высоком рабочем напряжении, вместо газонаполненных образцовых конденсаторов. Правильнее сказать, что эти конденсаторы должны были не заменять, а дополнять газонаполненные, так как они имели иные номинальные данные: емкость 0,01—0,1 мкф при напряжении 3 кВ и 0,001 мкф при напряжении 30 кВ. Указывается, что емкость этих конденсаторов не зависит от частоты в пределах изменения последней от 50 до 800 гц и при колебаниях температуры и напряжения изменяется не более чем на 0,5%; допускаемое отклонение от номинала $\pm 2\%$.

Конденсаторы собирались из плоскопрессованных секций; при емкости 0,001 мкф и напряжении 30 кВ вес конденсатора 20 кг.

Рассмотренные здесь типы конденсаторов постоянного напряжения или переменного напряжения низкой частоты не рассчитаны на нагрузку значительной реактивной мощностью. Иначе обстоит дело с конденсаторами для контуров средней частоты, в частности предназначенных для использования в электротермических установках с машинными генераторами.

Обычно в этих случаях при частоте порядка 1—10 кгц и напряжениях несколько сотен вольт применяют бумажные конденсаторы с водяным охлаждением. При пропитке маслом, в зависимости от рабочей частоты, получается удельная реактивная мощность 6—10 квар/дцм³ или 3,5—6 квар/кГ; переход к пропитке полярной хлорированной жидкостью — соволом позволяет повысить удельную реактивную мощность до 14—21 квар/дцм³. Однако и в этом случае конденсаторы остаются достаточно громоздкими; наличие водяного охлаждения, обусловленного большими потерями в этих конденсаторах (до 0,5%), усложняет их конструкцию и затрудняет эксплуатацию.

Применение полистирольной пленки в подобных конденсаторах позволяет снизить потери более чем в 10 раз и изготавливать конденсаторы с естественным воздушным охлаждением более простой конструкции и в некоторых случаях с лучшими удельными характеристиками.

Вальдбах отмечает, что полистирольные конденсаторы для электротермических устройств могут применяться в диапазоне частот 0,5—10 кгц при напряжениях порядка 200—3000 в. Конденсаторостроение в ГДР в течение ряда лет работало над усовершенствованием этих конденсаторов: проведена работа по выбору специального сорта масла, введены плоскопрессованные секции вместо ци-

линдрических и применена приварка выводов к фольге (алюминий, 6 мк) для снижения потерь в переходных контактах. Для полистирольно-масляного конденсатора реактивной мощностью 57 квар получены удельные значения 16,7 квар/дцм³ и 7,7 квар/кг.

Вальдбах сообщает, что масла нафтенового основания стойки к действию поля (газостойки), но растворяют стирофлекс, тогда как масла парафинового основания нейтральны к стирофлексу, но обладают пониженной устойчивостью к действию поля. По-видимому, это ошибка: в данном случае основное влияние должно иметь соотношение между парафино-нафтеновой и ароматической фракциями масла. Наличие ненасыщенной ароматики дает улучшение стойкости к действию поля, так как позволяет маслу присоединять водород, отщепляемый ионной бомбардировкой; вместе с тем, поскольку полистирол является ароматическим соединением, жидкие ароматические углеводороды масла должны растворять полистирольную пленку.

По данным Вальдбаха, было подобрано масло, не растворяющее стирофлекс в течение 15 лет при 20° С и в течение 3—5 лет при 40—60° С. Эти данные также внушают известное сомнение, так как одновременно указано, что работа по усовершенствованию конденсаторов продолжалась в течение 4 лет; за это время, очевидно, нельзя было проверить столь длительную стабильность пленки в масле.

Некоторые опыты по изучению поведения полистирольной пленки в масле были проведены Л. П. Кулигиной и И. П. Усовой. Сравнивались два сорта масла с коэффициентами преломления: А—1,4770 и Б—1,4887.

Второе масло заведомо должно содержать увеличенное количество ароматических соединений, хотя количественный анализ на содержание ароматических колец не производился. Выдержка пленки толщиной 20 мк в течение 1500 ч при 20° С в испытуемых образцах масла не показала различия в отношении изменения механической или электрической прочности пленки; тот же результат был получен при выдержке пленки в маслах А и Б в течение 80 ч при 60° С. Различие в исследованных сортах масла было установлено, когда был проведен опыт по медленному повышению температуры образца масла, с погруженным в него отрезком ленты полистирола. При нагревании от 60 до 66° С в течение 4 ч образец пленки в масле Б свернулся и спекся в сплошной комочек; для образца пленки в масле А такой же результат был получен после того, как вследствие дополнительного нагрева в течение 8 ч температура масла поднялась до 90° С.

По данным А. П. Бутра, после выдержки полистирольной пленки при комнатной температуре в течение года в масле высокой очистки с малым содержанием ароматики, было установлено, что электрическая прочность ее не изменилась, хотя сопротивление разрыву незначительно снизилось.

Таким образом, выбор пропитывающей жидкости для полистирольных конденсаторов связан с известными затруднениями, и при работе с нефтяными маслами, по-видимому, приходится смиряться с пониженной стойкостью масла к действию поля, чтобы подобрать масло, не разрушающее пленку.

Как отмечалось выше, при пропитке маслом необходимо отказываться от применения операции запекания, что, очевидно, ухуд-

шает стабильность емкости и повышает ТКЕ. Снижается также постоянная времени конденсатора и повышается коэффициент абсорбции. При небольших напряжениях увеличивается также $\operatorname{tg} \delta$, что можно заметить в левой части рис. 39, б; это объясняется появлением потерь, связанных с междуслойной поляризацией и особенно заметных при недостаточной очистке масла и увеличенном содержании в нем свободных ионов.

Поэтому наряду с полистирольно-масляными применяют также и полистирольно-воздушные конденсаторы из последовательно соединяемых секций с напряжением на секции не свыше 250 в (эфф.) В литературе ГДР и ФРГ можно найти сообщения о выпуске подобных конденсаторов с реактивной мощностью 20 квар при частоте 10 кГц. Удельные характеристики не приводятся, но, вероятно, они хуже, чем у полистирольно-масляных конденсаторов, особенно при повышенных рабочих напряжениях.

О выпуске мощных полистирольных конденсаторов для средних частот в США было сообщено фирмой Конденсер Продэктс в 1950 г. Некоторые данные об этих конденсаторах приведены в табл. 7. Величина $\operatorname{tg} \delta$ лежит в пределах 0,0002—0,00025. В рекламе не сообщается, с каким типом конденсатора мы имеем дело: полистирольно-воздушным или полистирольно-масляным. Судя по удельным характеристикам, эти конденсаторы близки к полистирольно-масляным конденсаторам, описанным Вальдбахом. Возможно, что вместо масла применена какая-либо иная жидкость, например кремний-органическая.

Таблица 7

Некоторые характеристики американских полистирольных конденсаторов для электротермических устройств

Частота, гц	Эффективное рабочее напряжение, в	Реактивная мощность, квар	Удельные характеристики	
			квар/дцм ³	квар/кг
400	1000	10	10,2	7,35
800	1500	11,25	11,4	8,3
2000	800	8,0	24,4	14,0

По данным завода «Конденсатор», изготовленный в 1956 г. опытный полистирольно-воздушный конденсатор электротермического типа реактивной мощностью 120 квар при напряжении 375 в и частоте 8 кГц имел габаритные размеры 115×380×330 мм, что дает удельную мощность порядка 8,35 квар/дцм³. Сопоставляя эти данные с табл. 7, можно думать, что улучшенные характеристики американских конденсаторов обусловлены применением жидкой пропитки. Кроме того, играет роль и резко сниженная номинальная мощность американского конденсатора, значительно облегчающая решение задачи отвода тепла из внутренних частей конденсатора.

§ 6. Проблема повышения нагревостойкости полистирольной пленки

Малая нагревостойкость полистирольной пленки не только неудобна тем, что ограничивает верхний предел рабочей температуры полистирольных конденсаторов значениями 60—70°С (или 80—85°С при условии снижения требований к электрическим свойствам), которые в некоторых случаях заставляют отказываться от использования этих конденсаторов; малая нагревостойкость неудобна также в технологическом отношении, так как затрудняет проведение операций пайки или приварки контактов к обкладкам, операций металлизирования пленки и контактирования торцов металло-пленочных секций, операций сушки и пропитки при изготовлении мощных конденсаторов и т. п.

Выше уже отмечалась возможность повышения нагревостойкости пленки путем применения для ее изготовления весьма чистого полистирола с повышенным молекулярным весом; однако этим путем пока удавалось получить выигрыш только порядка 10°С.

Наиболее простым путем для повышения нагревостойкости пленки в настоящее время является, по-видимому, изготовление ее из сополимеров полистирола с другими высокомолекулярными веществами, добавка которых может повысить нагревостойкость при сохранении электрических свойств на достаточно высоком уровне.

На рис. 40 приведены некоторые данные о сополимерах стирола, взятые из книги Хиппеля. Зависимость диэлектрической проницаемости и угла потерь от температуры при трех значениях частоты для сополимера стирола с акрилонитрилом показана на рис. 40, а; в данном случае мы получаем полярный продукт с повышенной ϵ , но одновременно и с повышенными потерями. Такой материал уже не может быть полноценным заменителем полистирола в высокочастотной технике. Лучшие результаты дает сополимеризация стирола с 2,4-диметилстиролом, как показывает рис. 40, б; в этом случае при повышении нагревостойкости до 100°С электрические характеристики сохраняются на том же уровне, что и у чистого полистирола.

Тэрнер приводит следующие данные о сополимере стирола с метилстиролом, опробованном в Англии для получения пленок методом продавливания с вытягиванием (как и в производстве ориентированной полистирольной пленки): плотность — 1,05 г/см³, временное сопротивление разрыву 560 кг/см², удлинение 2%, модуль упругости $2,8 \cdot 10^4$ кг/см², температура размягчения 130°С, $\epsilon = 2,54$ и $\text{tg} \delta = 3 \cdot 10^{-4}$ (50 гц).

По-видимому, имеется в виду тот же материал, для которого приведены характеристики на рис. 40, б.

На рис. 40, в представлены характеристики конденсатора, изготовленного из пленки сополимера стирола; его состав не указан.

В данном случае повышение нагревостойкости достигнуто за счет заметного ухудшения постоянной времени и усиления температурной зависимости емкости: в диапазоне температур от -40 до $+120^\circ\text{C}$ величина ТКЕ равна $+500 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Значение $\text{tg} \delta$ относительно невелико в диапазоне температур от 0 до 120°C .

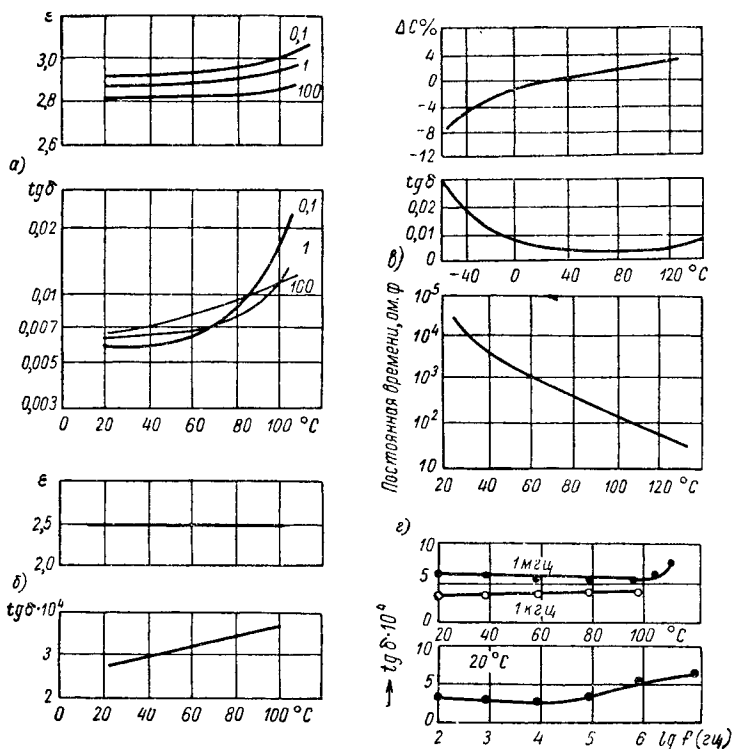


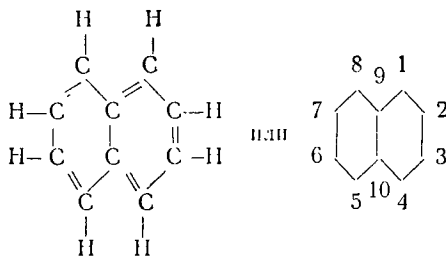
Рис. 40. Электрические свойства сополимера стирола:

а — зависимость диэлектрической проницаемости и угла потерь сополимера стирола с акрилонитрилом от температуры при трех значениях частоты (цифры у кривых — частота в кГц); б — зависимость диэлектрической проницаемости и угла потерь сополимера стирола с диметилстиролом от температуры при частоте 1 МГц ; в — зависимость емкости, угла потерь и постоянной времени конденсатора, изготовленного из сополимера стирола, от температуры; емкость и угол потерь измерены при частоте 1 кГц ; г — зависимость угла потерь сополимера стирола с бета-винилнафталином от температуры и частоты.

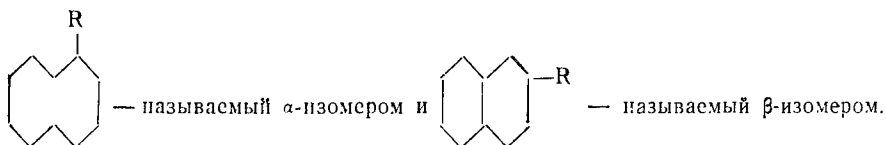
В обзорной работе Уайтхеда (1953 г.) отмечалось, что нагревостойкость до 120°C может быть получена при сополимеризации полистирола с некоторыми производными нафталина. Возможно, что данные рис. 40, в относятся именно к этому типу диэлектрика.

Исследование этого вопроса в СССР было проведено Н. Ф. Усмановой и А. В. Голубевой с сотрудниками.

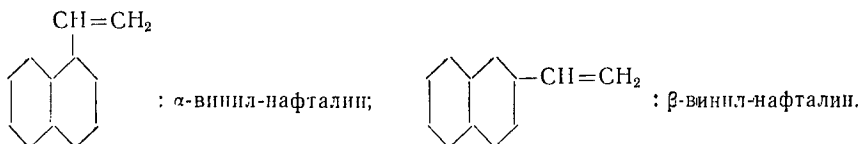
Напомним структуру молекулы нафталина:



При замещении одного из атомов водорода в молекуле нафталина каким-либо радикалом R — имеет значение, с каким из атомов углерода был связан данный атом водорода. При этом углеводородные атомы 1, 4, 5 и 8, с одной стороны, и атомы 2, 3, 6 и 7, с другой, находятся в тождественных отношениях ко всем другим атомам углерода и водорода, а потому при замещении при них атома водорода на радикал должны получаться тождественные продукты двух типов, а именно:



Для исследования были выбраны подобные два изомера винил-нафталина: α и β .



Оба эти продукта относительно легко получить непосредственно из нафталина с выходом, превышающим 50% от исходного сырья. Изомер α представляет собой жидкость с плотностью $1,032 \text{ г/см}^3$, коэффициентом преломления $1,6436$ и точкой кипения $85\text{—}86^\circ\text{C}$ (при $1,5 \text{ торр}$), а изомер β — твердое вещество с плотностью $1,048 \text{ г/см}^3$ и температурой плавления $65\text{—}66^\circ\text{C}$.

Попытка получить нагревостойкий заменитель полистирола путем непосредственной полимеризации этих продуктов не дала положительных результатов. Электрические свойства полимеров винил-нафталина были близки к свойствам полистирола: $\epsilon = 2,6$ и $\text{tg } \delta = 3 \div 5 \cdot 10^{-4}$ при 20°C и частоте 1 Мгц , а нагревостойкость — резко повышена (по методу Вика — порядка 160°C); но механические свойства оказались совершенно неудовлетворительными: полученные полимеры были весьма хрупки и неудобны для переработки.

В связи с этим было проведено изучение вопроса о возможности сополимеризации стирола с α - и β -винил-нафталином. Хорошие результаты получены с применением β -изомера при оптимальном соотношении β -винил-нафталина и стирола по весу $30:70$ (или $1:3,45$ моля). Полученный сополимер такого состава имел нагревостойкость на $20\text{—}25^\circ\text{C}$ выше, чем у полистирола, если

оценивать ее по началу размягчения (методом Мартенса); плотность сополимера $1,08 \text{ г/см}^3$; гигроскопичность немного выше, чем у полистирола: $0,06\text{—}0,07\%$ при лежании в воде 24 ч. Диэлектрическая проницаемость в пределах температур $20\text{—}100^\circ\text{С}$ и частот от 1 кГц до 10 МГц была равна $2,5\text{—}2,7$; при 20°С и частоте 1 МГц величина $\text{tg } \delta$ составляла $4\div 6 \cdot 10^{-4}$; зависимость этой характеристики от температуры и частоты показана на рис. 40, г. При 20°С удельное сопротивление $\rho_v = 1\text{—}2 \cdot 10^{17} \text{ ом}\cdot\text{см}$; при 100°С было измерено значение порядка $1 \cdot 10^{16} \text{ ом}\cdot\text{см}$. Электрическая прочность оказалась такой же, как у образцов полистирола,

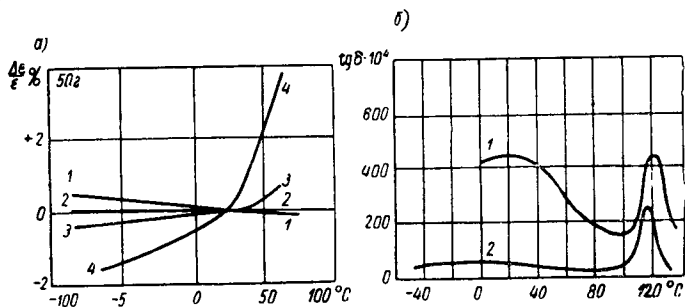


Рис. 41. Электрические характеристики сополимера стирола с метилметакрилатом: а — изменение диэлектрической проницаемости с температурой.

1 — содержание метилметакрилата 0%; 2 — 5%; 3 — 10%; 4 — 40%;

б — изменение угла потерь с температурой.

1 — 80,5%; 2 — 24,4% метилметакрилата.

изготавливавшихся параллельно. Для получения достаточно высоких значений электрических свойств сополимер надо было очищать от полярных примесей, например метил-β-нафтил-карбинола, и от остатков исходных мономеров.

Проведенные опыты показали, что данный сополимер, как и полистирол, может обрабатываться методами прессования, выдавливания и литья под давлением; по-видимому, он позволит также получать из него и ориентированную пленку, пригодную для использования в конденсаторах, которые должны быть близки к полистирольным по электрическим свойствам, но будут иметь повышенное значение верхнего предела рабочей температуры. Судя по приведенным выше данным, можно оценить этот верхний предел значением порядка $85\text{—}90^\circ\text{С}$. Температура 100°С , вероятно, будет уже велика, если требовать достаточно высокой стабильности емкости.

Использование сополимеризации может помочь не только увеличению нагревостойкости полистирола, но и улучшению некоторых других его характеристик. Так, П. П. Кобеко и Г. П. Михайлов показали, что путем сополимеризации стирола и метилметакрилата можно резко ослабить температурную зависимость ϵ (рис. 41, а). При содержании в сополимере около 5% метилметакрилата значение $\text{ТК}\epsilon$ приближается к нулю. Однако при этом

потери будут все же увеличены в сравнении с чистым полистиролом, хотя величина $\lg \delta$ резко снижается при уменьшении содержания полярного компонента — метилметакрилата в данном сополимере (рис. 41, б).

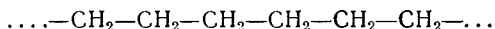
§ 7. Полиэтиленовая пленка и ее применение в конденсаторостроении

Исходным веществом для получения полиэтилена служит газ этилен $\text{CH}_2=\text{CH}_2$, имеющий температуру плавления -169°C , температуру кипения $-103,8^\circ\text{C}$ и плотность 0,570 (при температуре кипения). Этилен представляет собой дешевое и доступное сырье, получаемое путем переработки нефти; в связи с этим полиэтилен является одним из наиболее дешевых высокомолекулярных материалов, и производство его быстро расширяется.

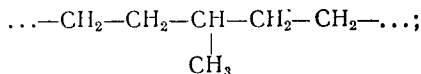
В зависимости от условий полимеризации из этилена могут быть получены продукты разнообразных типов, начиная от жидких и кончая твердыми. Мы будем рассматривать здесь только твердый полиэтилен. Получение этого продукта было осуществлено вначале с помощью сложной технологии, требовавшей применения давления до 3000 ат и температуры 200°C . В дальнейшем удалось снизить давление, необходимое для проведения полимеризации этилена, до 1500—2000 ат. Такой полиэтилен известен под названием полиэтилена высокого давления (ПВД); его молекулярный вес составляет 15 000—35 000.

Используя специальные катализаторы, выпускают также полиэтилен низкого давления (ПНД), получаемый при нормальном давлении или при давлении порядка 20—50 ат.

Молекулы полиэтилена имеют зигзагообразную плоскую структуру, характерную для обычной парафиновой цепи:



Это линейная неразветвленная структура; могут иногда встречаться и редкие боковые метильные группы:



большее разветвление структуры молекулы наблюдается для ПВД, чем для ПНД. Кроме метильных групп в полиэтилене могут содержаться также атомы кислорода, образующие группы $-\text{CO}-$.

Высокая симметричность макроцепи молекул полиэтилена объясняет склонность его к кристаллизации, несмотря на малые межмолекулярные силы. В обычных температурных условиях полиэтилен состоит примерно на 75% из кристаллической фазы и на 25% из аморфной. Можно заметно увеличить содержание аморфной фазы путем «закалки» полиэтилена, т. е. его нагрева и резкого охлаждения, при котором кристаллизация не успевает завер-

шиться. Наличие аморфной фазы придает полиэтилену морозостойкость (до $-70 \div -80^\circ\text{C}$); кристаллическая фаза, имеющая точку плавления порядка $110\text{--}115^\circ\text{C}$, обеспечивает жесткость полиэтилена при нормальных температурах и позволяет применять его до температур порядка 90°C .

По внешнему виду полиэтилен представляет собой желтоватобелый роговидный продукт с плотностью $0,92\text{--}0,95 \text{ г/см}^3$. По прочности на разрыв он уступает полистиролу, но отличается от него

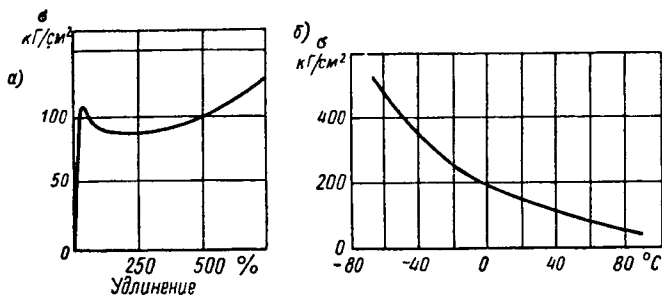


Рис. 42. Механические свойства полиэтилена: а — диаграмма растяжения для полиэтиленовой пленки; б — зависимость временного сопротивления разрыву от температуры.

увеличенной эластичностью. Некоторые данные о механических свойствах полиэтилена приведены на рис. 42. Эти данные следует рассматривать как ориентировочные, так как они могут колебаться в соответствии с изменением соотношения аморфной и кристаллической фаз.

Полиэтилен может перерабатываться в пленку тем же методом, что и полистирол, т. е. выдавливанием в горячем виде с растягиванием. Чаше, однако, для изготовления полиэтиленовой

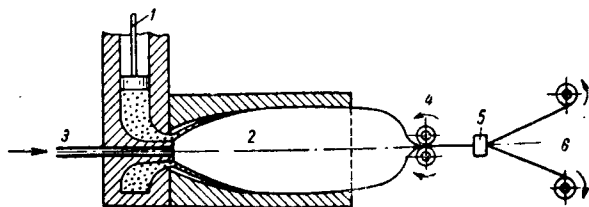


Рис. 43. Схема получения полиэтиленовой пленки методом выдувания.

пленки применяют метод выдувания, схема осуществления которого показана на рис. 43. Поршень 1 выжимает расплавленный полиэтилен в камеру 2, в которую по трубке 3 подается сжатый воздух. Полиэтилен образует тонкостенный пузырь («колбаску»), причем происходит и процесс растягивания пленки (стенки пузыря). Далее, на вальцах 4 «колбаска» сплющивается и в устройстве 5 разрезается на две ленты, наматываемые на шпиндели 6.

Этим методом из полиэтилена готовят пленки толщиной порядка нескольких десятков микрон.

Полиэтилен представляет собой типичный неполярный диэлектрик; его диэлектрическая проницаемость даже ниже, чем у полистирола и равна 2,2—2,3 в широком диапазоне частот; в конденсаторах с обкладками из фольги за счет наличия воздушного зазора эффективное значение ϵ еще ниже; при расчете полиэтиленовых конденсаторов Мистич предлагает принимать значение $\epsilon = 1,85$. Зависимость от температуры для полиэтилена выражена сильнее, чем для полистирола; это является существенным недостатком полиэтиленовой пленки при ее использовании в конденсаторостроении.

Некоторые данные об электрических свойствах полиэтилена, взятые из обзорной работы Г. П. Михайлова, приведены на рис. 44. Угол потерь чистого полиэтилена того же порядка, что у полистирола, или ненамного выше; однако в отличие от полистирола на кривой $\text{tg} \delta = f(t)$ для полиэтилена наблюдается ряд максимумов (рис. 44, а). Это объясняется тем, что полистирол применяется ниже температуры его остеклования, а полиэтилен — выше этой температуры, что позволяет проявляться ряду явлений релаксационного характера.

У полиэтилена низкого давления (ПНД) (кривая 1) наблюдается два максимума: низкотемпературный и высокотемпературный; первый из них, видимо, связан с наличием небольшого количества полярных групп: $-\text{CO}-$, а второй с релаксацией звеньев макромолекулы полиэтилена. После «закалки», когда содержание аморф-

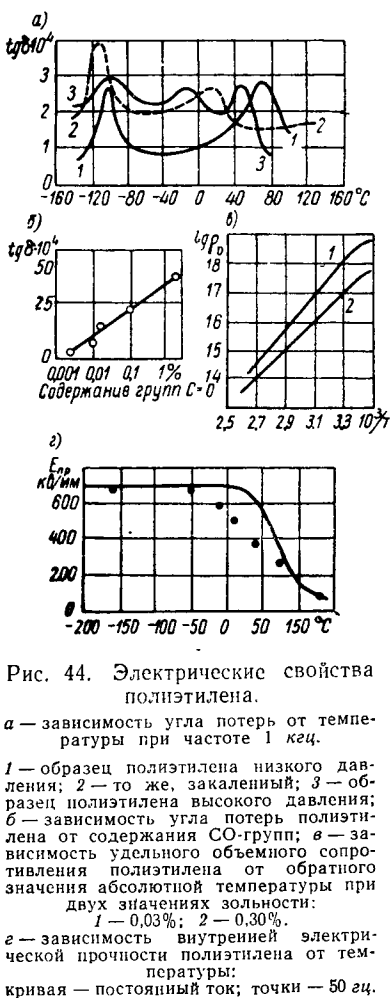


Рис. 44. Электрические свойства полиэтилена.

а — зависимость угла потерь от температуры при частоте 1 кГц.

1 — образец полиэтилена низкого давления; 2 — то же, закаленный; 3 — образец полиэтилена высокого давления; б — зависимость угла потерь полиэтилена от содержания CO -групп; в — зависимость удельного объемного сопротивления полиэтилена от обратного значения абсолютной температуры при двух значениях зольности: 1 — 0,03%; 2 — 0,30%.

г — зависимость внутренней электрической прочности полиэтилена от температуры: кривая — постоянный ток; точки — 50 гц.

ной фазы увеличивается, высокотемпературный максимум сильно сдвигается влево (кривая 2), так как движение звеньев облегчается при уменьшении числа закристаллизованных областей.

У полиэтилена высокого давления (ПВД) наблюдается три максимума; Г. П. Михайлов полагает, что появление третьего максимума связано с тем, что молекулы ПВД более разветвлены, чем молекулы ПНД (кривая 3).

Электрические свойства полиэтилена заметно зависят от его загрязнения продуктами окисления (группы: $-\text{CO}-$; рис. 44, б) или следами катализатора, о которых можно судить по увеличению

ной зольности (рис. 44, в). Удельное сопротивление полиэтилена велико, но все же он уступает полистиролу по этой характеристике.

Внутренняя электрическая прочность полиэтилена, измеренная в отсутствие краевых разрядов на небольших участках тонких пленок, может превышать 600 кВ/мм, но заметно снижается в области положительных температур. Так же, как и в случае полистирола, наблюдается характерное для неполярных продуктов постоянство электрической прочности в области низких температур; это находится в качественном согласии с теорией пробоя Фрелиха.

На реальных образцах пленки толщиной 27 мк, при электродах диаметром 10 мм, Б. Н. Горбунов нашел значения кратковременной прочности порядка 300 кВ/мм при постоянном токе и 160 кВ/мм при частоте 50 Гц.

По данным Н. А. Родионовой, гигроскопичность полиэтилена выше, чем у полистирола и при длительной выдержке в условиях влажности 98% достигает 1,3%; однако изменение его электрических свойств при поглощении влаги меньше, чем у полистирола (рис. 45, ср. рис. 3).

Коэффициент влагопроницаемости у полиэтилена, равный $2,8 \times 10^{-10}$ г/см·ч тор, значительно ниже, чем у полистирола (см. § 2); то же можно сказать и о коэффициенте диффузии влаги, который для полиэтилена равен всего $1 \cdot 10^{-5}$ см²/ч.

Полиэтилен широко применяется в производстве высокочастотных кабелей как в СССР, так и за рубежом; поэтому можно найти в литературе много исследований этого материала применительно к его использованию в кабельной технике. Однако данные этих исследований соответствуют относительно большим толщинам материала, а потому распространение их на случай применения полиэтиленовых пленок в конденсаторах далеко не всегда возможно.

Основные сведения о полиэтиленовых конденсаторах можно найти в американской работе Мистича, поскольку до последнего времени только в США имелся некоторый опыт производства и применения таких конденсаторов; отдельные сведения приводятся также в обзорной английской работе Козенса.

Мистич указывает толщину пленки полиэтилена, равную 37—50 мк; это согласуется с данными Козенса: 40—50 мк. При таких значениях толщины пленки можно применять ее только в конденсаторах с относительно высоким напряжением. В США полиэтиленовая пленка применяется для изготовления высоковольтных конденсаторов постоянного напряжения и радиочастоты, а также для конденсаторов линий формирования импульсов в радиолокационной аппаратуре.

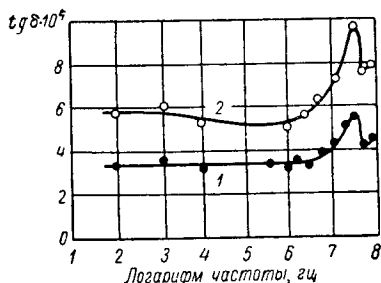


Рис. 45. Зависимость угла потерь полиэтилена от частоты при разном содержании влаги.

1 — тщательно высушенный образец; 2 — образец, содержащий 1,3% влаги после пребывания в условиях относительной влажности 98% до установления равновесия.

В отличие от жесткой полистирольной пленки, пленка полиэтилена эластична, что уменьшает опасность появления слабых мест, обусловленных хрупкостью материала. Электризация поверхности пленки при намотке и осаждение частичек пыли, способных создавать слабые места, должны иметь место, как и в случае полистирола, так как поверхностное сопротивление полиэтилена велико; однако, поскольку пленка применяется в больших толщинах, эти явления, видимо, менее опасны.

Мистич называет пределы рабочей температуры для полиэтиленовых конденсаторов от -70 до $+85^{\circ}\text{C}$ (по другим данным до 90°C). Верхний предел рабочей температуры может быть значительно повышен путем облучения пленки, что приводит к образованию поперечных связей между молекулами полиэтилена и повышает его нагревостойкость. Козенс указывает предельную температуру 120°C , а Мистич 150°C ; отмечается, что хотя физическая нагревостойкость возрастает, но опасность окисления при длительном прогреве остается; поэтому конденсаторы с рабочей температурой порядка 100°C и выше должны герметизироваться, чтобы исключить доступ кислорода из окружающей среды к диэлектрику.

По английскому патенту ¹ было предложено проводить облучение уже намотанных конденсаторных секций, а не самой пленки до намотки. Можно применять рентгеновские лучи, β - и γ -излучения и поток тепловых нейтронов. Для того чтобы поднять рабочую температуру полиэтиленового конденсатора на 50°C , нужна доза облучения $6 \cdot 10^7$ рентген. При этом играет известную роль материал обкладок. В случае применения металлической фольги наилучшие результаты дает алюминий, так как он обладает меньшим экранирующим действием и быстрее теряет радиоактивность, приобретенную при облучении конденсаторной секции.

Пленка полиэтилена, как и полистирольная, является ориентированной, а потому для нее возможно применение операции запекания, но при соответственно повышенной температуре. Мистич указывает, что для стабилизации (после запекания) желательно давать несколько температурных циклов. Стабильность емкости запеченных полиэтиленовых конденсаторов хуже, чем полистирольных. Мистич указывает, что при старении конденсаторов в комнатных условиях уход емкости за год составляет менее $0,3\%$; после температурных циклов: $85 \dots 25 \dots -60 \dots -25^{\circ}\text{C}$ изменение емкости — порядка $0,25\%$. Козенс называет более высокую цифру: $0,5\%$.

В соответствии с более резкой зависимостью ϵ полиэтилена от температуры емкость полиэтиленовых конденсаторов сильнее изменяется с температурой, чем полистирольных. На рис. 46, а показана зависимость $C=f(t)$ для трех полиэтиленовых конденсаторов: 1 — непропитанный конденсатор, по данным Мистича, 2 — по его же данным, конденсатор, пропитанный диметилсиликоном, 3 — конденсатор, пропитанный кремний-органической жидкостью «калория-2», по данным Б. Н. Горбунова. Значения ТКЕ для этих конденсаторов составляют: 1: $-520 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, 2: $-610 \cdot 10^{-6}$

¹ Англ. патент, кл. 37, № 758 197, 3.10.1956, Шен Тзе Ен.

и 3: $-400 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. В другой работе Мистича указывается среднее значение ТКЕ для пределов температуры $20-85^\circ \text{C}$, равное $-700 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$; Козенс приводит меньшее значение: $-500 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Таким образом, ТКЕ у этих конденсаторов

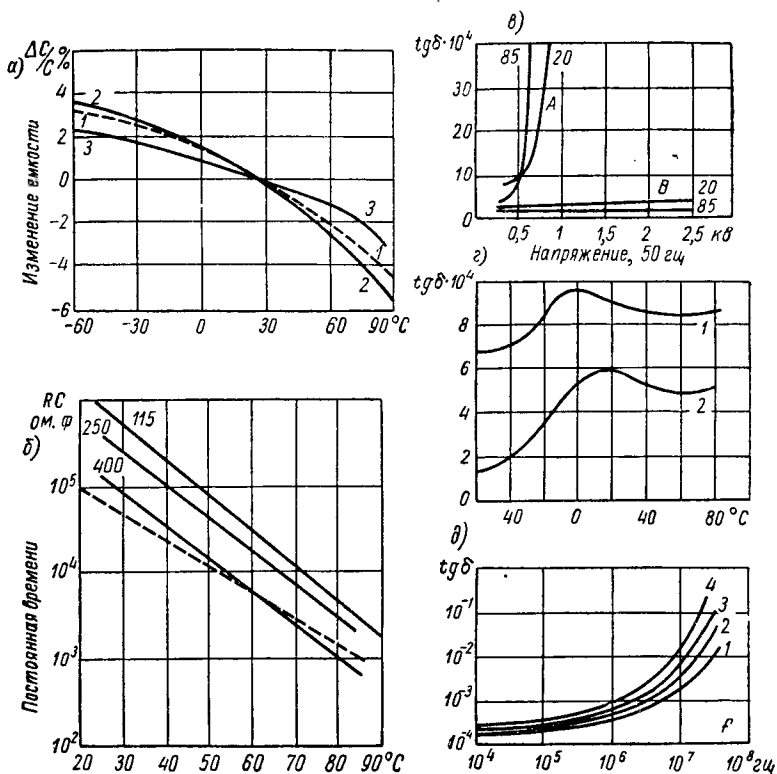


Рис. 46. Электрические свойства полиэтиленовых конденсаторов:

- а — зависимость емкости от температуры.
 1 — непропитанный образец; 2 и 3 — пропитанные образцы;
 б — зависимость постоянной времени от температуры; сплошные кривые — непропитанный образец; цифры указывают напряжение при измерении в вольтах; пунктир — пропитанный образец;
 в — зависимость угла потерь от напряжения при частоте 50 гц и двух значениях температуры.
 А — непропитанный образец; В — пропитанный образец; цифры у кривых — значения температуры в град. Емкость 2000 пф, диэлектрик $4 \times 50 \text{ мк}$;
 г — зависимость угла потерь от температуры при двух значениях номинальной емкости.
 1 — 0,001 мкф, 2 — 0,015 мкф.
 д — зависимость угла потерь американских полиэтиленовых конденсаторов с разными номинальными данными от частоты:
 1 — 250 пф; 3,5 кв; 2 — 1000 пф; 3,5 кв; 3 — 2000 пф; 10 кв; 4 — 2000 пф; 20 кв (пост. ток).

резко увеличен, что делает их непригодными для работы в контурах высокой частоты, требующих стабильной емкости.

Постоянная времени полиэтиленовых конденсаторов высока и приближается к тем значениям, которые имеют полистирольные конденсаторы. При комнатной температуре можно получить до

$10^5 - 10^6 \text{ ом} \cdot \text{ф}$ (рис. 46, б); пропитка несколько снижает постоянную времени, как и в случае полистирольных конденсаторов. При повышении напряжения также наблюдается некоторое снижение постоянной времени.

Угол потерь правильно изготовленных полиэтиленовых конденсаторов весьма мал, как и у полистирольных конденсаторов. При частоте 1 кГц Мистич указывает значение менее $5 \cdot 10^{-4}$, а Козенс — $3 \cdot 10^{-4}$. При повышении напряжения, как показано на рис. 46, в, по данным Б. Н. Горбунова, для непропитанных конденсаторов наблюдается резкое возрастание угла потерь уже при напряжениях порядка 400—500 в, обусловленное развитием ионизационных процессов; пропитка, точнее, заливка жидким диэлектриком зазоров между пленкой и обкладками позволяет получать малый $\text{tg} \delta$ и при более высоких напряжениях.

Температурная зависимость угла потерь для двух полиэтиленовых конденсаторов емкостью 0,001 и 0,015 мкф, по данным Б. Н. Горбунова, показана на рис. 46, д (частота 1 кГц). Ясно проявился среднетемпературный максимум угла потерь, характерный для полиэтилена высокого давления (см. рис. 44, а). Увеличенные потери образца 0,001 мкф не характерны для полиэтиленовых конденсаторов и обусловлены каким-либо случайным дефектом, например увеличенным переходным сопротивлением между выводом и обкладкой, и т. п.

При повышении частоты угол потерь полиэтиленовых конденсаторов, как и в случае полистирольных конденсаторов, возрастает за счет потерь в металлических частях конденсатора (рис. 46, д, по данным Мистича); увеличение емкости и рабочего напряжения конденсаторов, приводящее к увеличению площади обкладок, сопровождается увеличением угла потерь при высоких частотах.

Будучи неполярным диэлектриком, полиэтилен должен давать малые значения коэффициента абсорбции при его использовании в конденсаторах. Все же эта характеристика у полиэтиленовых конденсаторов несколько хуже, чем у полистирольных: Козенс приводит значения $k_a = 0,1 - 0,5\%$, и Мистич отмечает, что при температурах до 70°C обычно получается значение менее $0,5\%$. Эти данные относятся к непропитанным конденсаторам; после пропитки диметилсиликоном k_a возрастает до 5% .

Поведение при воздействии ионизации у полиэтиленовой пленки примерно такое же, как у полистирольной: по данным Дакина и Филовского, для полистирола (при толщине 110 мк, напряженности 24 кВ/мм и частоте 60 Гц) время до пробоя при воздействии короны составляет 75 ч, а для полиэтилена, в тех же условиях, 60 ч. Поэтому для конденсаторов из полиэтилена, рассчитанных на работу при переменном напряжении, надо добиваться устранения ионизации. Напряжение начала ионизации, по данным Мистича, составляет: при толщине 25 мк — 500 в, при 250 мк — 1200 в и при 2,5 мм — 5000 в (эфф.). В конструкции конденсаторов высокого напряжения для устранения ионизации при-

ходится прибегать к пропитке и к последовательному соединению секций.

При комнатной температуре полиэтилен весьма устойчив к разнообразным растворителям, но при температурах выше 50—60°С начинает растворяться в нефтяном масле и в хлорированных массах, т. е. несовместим с обычными типами пропиточных масс, широко применяемых в конденсаторостроении. В практике США для пропитки полиэтиленовых конденсаторов применяют кремний-органическую жидкость — диметилсиликон с вязкостью выше 50 сантистокс.

Указанным выше значениям ионизирующего напряжения при разных толщинах соответствуют следующие значения напряженности поля: при 25 мк — 20 кВ/мм; при 250 мк — 4,8 кВ/мм и при 2,5 мм — 0,2 кВ/мм. Видимо, эти значения получены для непропитанных образцов. Для того чтобы ионизация отсутствовала, надо брать $E_{\text{раб}}$ ниже этих значений. Для пропитанных секций, очевидно, можно повышать значения $E_{\text{раб}}$ до значений такого же порядка, которые берутся для пропитанной бумаги.

При постоянном напряжении, когда опасность ионизации резко ослаблена, можно брать еще более высокие значения $E_{\text{раб}}$. Мистич отмечает, что для выбора $E_{\text{раб}}$ надо ориентироваться на то, чтобы при 1,5 $E_{\text{раб}}$ и максимальном значении рабочей температуры конденсаторы имели срок службы не менее 250 ч. Конденсаторы, изготовленные из пленки 37,5 мк (число слоев между обкладками не указано, равно как и емкость) проработали при температуре 65°С и напряженности поля 40 кВ/мм в течение 1000 ч. По предварительным данным Б. Н. Горбунова, для многослойных конденсаторов из пленки 50 мк при емкостях 0,001—0,010 мкФ $E_{\text{раб}}$ при постоянном напряжении может быть взята порядка 50 кВ/мм. При частоте 50 Гц он рекомендует снижать $E_{\text{раб}}$ до 6 кВ/мм.

Сопоставляя приведенные здесь данные для полиэтиленовых и полистирольных конденсаторов, можно увидеть, что по всем показателям, кроме нагревостойкости и, может быть, допустимых значений $E_{\text{раб}}$, полиэтиленовые конденсаторы хуже полистирольных, особенно по величине ТКЕ. Существенным преимуществом их является только возможность дополнительного повышения нагревостойкости путем облужения, что, впрочем, усложняет технологию и повышает стоимость конденсатора.

Вероятно, в первую очередь полиэтиленовые конденсаторы могли бы представить интерес в тех случаях, когда нужен конденсатор с малыми потерями, относительно высоким рабочим напряжением и такой емкостью, которая уже делает желательным использование принципа намотки секций; при этом от конденсатора не должна требоваться особая стабильность емкости и малый ТКЕ. С этой точки зрения конденсаторы данного типа стоит опробовать в качестве контурных для электротермических установок с рабочей частотой порядка килогерц или десятков килогерц.

Кроме того, они могли бы применяться в тех случаях, когда нужны конденсаторы с высокой постоянной времени и малой

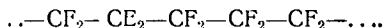
абсорбцией, а полистирол не годится вследствие ограниченной нагретостойкости. В этом случае могут также применяться описанные ниже конденсаторы из политетрафторэтиленовой пленки, но стоимость их будет много выше полиэтиленовых.

§ 8. Пленка из политетрафторэтилена-фторопласта-4

Исходный продукт для получения фторопласта-4: тетрафторэтилен $\text{CF}_2=\text{CF}_2$ представляет собой нетоксичный газ без цвета и запаха с температурой кипения $-76,3^\circ\text{C}$, температурой замораживания $-142,5^\circ\text{C}$, критической температурой $-33,3^\circ\text{C}$ и критическим давлением 37,8 ат. Удельный вес в жидком состоянии при -40°C составляет 1,368.

Тетрафторэтилен может быть получен различными методами, например, из монохлордифторметана путем его пиролиза или из тетрафтордихлорэтана при высокой температуре в присутствии цинка.

Реакция полимеризации, при которой образуется высокомолекулярный продукт — политетрафторэтилен:



протекает при умеренном давлении в присутствии инициаторов; вследствие экзотермичности этой реакции надо обеспечивать быстрый отвод тепла и поддерживать постоянный температурный режим. Поэтому полимеризацию тетрафторэтилена ведут в эмульсиях.

Особенностью политетрафторэтилена (ПТФЭ) является его принадлежность к чисто фторо-углеродистым соединениям; в молекулах ПТФЭ цепочка атомов углерода связана только с атомами фтора. Связь углерода с фтором в таком соединении, как ПТФЭ, является одной из наиболее прочных связей в органических соединениях; энергия связи $\text{C}-\text{F}$ составляет 107 ккал/моль; для примера укажем, что энергия такой прочной связи, как $\text{Si}-\text{O}$, равна 89 ккал/моль.

Кроме того, размеры атомов фтора как раз таковы, чтобы образовать плотный слой поверх цепочки атомов углерода; этот слой образует прочную оболочку, защищающую углеродную цепочку от воздействия химических реагентов. Это объясняет высокую химическую стойкость ПТФЭ и его необычно высокую для органического соединения нагретостойкость.

По этой же причине ПТФЭ практически негигроскопичен и исключительно влагостоек.

Простая линейная форма молекул ПТФЭ и относительно большая энергия взаимодействия между атомами фтора соседних молекул (порядка 2 ккал/моль) обуславливает его склонность к кристаллизации и повышенное содержание кристаллической фазы в сравнении с таким полимером, как, например, полиэтилен. Температура стеклования ПТФЭ так же низка, как у полиэтилена (порядка -80°C), но температура плавления примерно на 200°C

выше и составляет 320—327° С. Сочетание некоторого количества аморфной фазы с высокоплавкой кристаллической фазой дает ПТФЭ, подобно полиэтилену, известную гибкость и эластичность.

Надо отметить, что ПТФЭ после расплавления не течет, как большинство линейных полимеров. При повышении температуры выше 327° С кристаллическая структура этого вещества разрушается и он переходит в аморфный прозрачный гель, не растекаясь при этом. Большая вязкость ПТФЭ в расплавленном состоянии обусловлена его очень высоким молекулярным весом: 140 000—500 000 и выше. Это исключает возможность применения литья под давлением для изготовления изделий из порошка ПТФЭ и требует использования более сложной технологии: сухой прессовки при комнатной температуре и спекания при температуре, превышающей температуру образования геля.

Схема такого формования изделия из ПТФЭ в виде полного цилиндра показана на рис. 47. На прессформу 1 помещается загрузочная воронка 2, через верхнее отверстие которой подается порошок ПТФЭ; с помощью рукоятки 3 вращают лопатки 4, которые измельчают комки порошка и способствуют его прохождению через сито 5; порошок 6 заполняет свободное пространство между наружной стенкой пресс-формы 1, ее вставным дном 7 и внутренней стенкой 8. Отверстие, ограниченное этой стенкой, прикрывается от попадания порошка колпаком 9. После засыпки порошка в пресс-форму его поверхность выравнивается гребенкой для обеспечения равномерного распределения давления при последующем прессовании. Прессовка ведется одновременно с двух сторон с подачей давления снизу на смещающееся дно пресс-формы и сверху на вложенный в пресс-форму поверх порошка кольцеобразный пуансон.

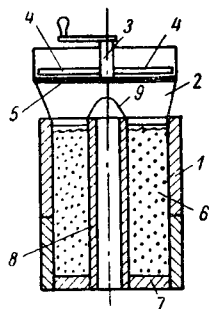


Рис. 47. Схема формования заготовки из порошка политетрафторэтилена.

При формовании порошок сжимается примерно до $\frac{1}{4}$ своего начального объема. Запекание проводится при температуре 370° С в течение нескольких часов; наличие внутреннего отверстия в пресс-форме позволяет осуществить равномерный нагрев внутри и снаружи отформованного цилиндра.

Обычным способом получения пленки из ПТФЭ является снятие на станке широкой стружки с вращающейся цилиндрической заготовки, изготовленной описанным здесь способом, с последующим вальцеванием пленки для снижения ее толщины до нужного значения. При этом пленка делается ориентированной, что позволяет производить запекание намотанных из нее конденсаторов так же, как и в случае полистирольной пленки, но при значительно более высоких температурах.

Этим методом удастся получить толщину пленки до 6 мк, но чаще применяют более толстые пленки, так как при малых

толщинах число слабых мест в пленке при такой технологии ее производства очень велико.

Политетрафторэтилен, известный у нас также под названием «фторопласт-4», а в зарубежной технике обычно носящий американское название «тефлон», представляет собой типичный неполярный полимер с небольшим значением диэлектрической проницаемости, составляющей при комнатной температуре около 2,0 и не зависящей от частоты в широких пределах ее изменения.

Изменение ϵ с температурой, по данным Эрлиха, показано на рис. 48, а. В области температур до 200°С ПТФЭ изменяет ϵ почти линейно с температурным коэффициентом порядка

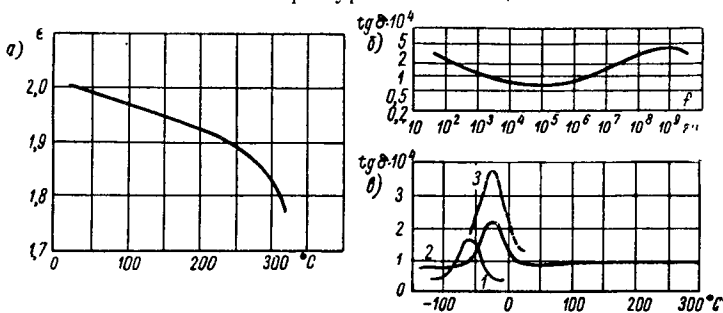


Рис. 48. Диэлектрическая проницаемость и угол потерь политетрафторэтилена.

а — зависимость диэлектрической проницаемости от температуры;
б — зависимость угла потерь от частоты при комнатной температуре;
в — зависимость угла потерь от температуры при двух значениях частоты.
1 — при 5 кГц; 2 — при 2.2 МГц; 3 — при 2.2 МГц, но для закаленного образца.

— $223 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$; при дальнейшем повышении температуры падение ϵ заметно увеличивается; среднее значение ТК_ϵ в интервале: 25—300°С составляет $-310 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Эрлих отмечает, что изменение ϵ политетрафторэтилена с температурой в первом приближении соответствует формуле Клаузиуса — Мосотти с учетом поля Лоренца. По данным этого исследователя в пределах температуры от 25 до 314°С и частоты от 100 гц до 100 кГц величина $\text{tg } \delta$ лежит ниже $2 \cdot 10^{-4}$.

Изменение угла потерь ПТФЭ при комнатной температуре в более широком интервале частот, по данным Хиппеля, показано на рис. 48, б. При частоте порядка 10^9 гц наблюдается небольшой максимум. Г. П. Михайлов, ссылаясь на других американских исследователей, отмечает, что данный максимум должен лежать в пределах частот 10^7 — 10^8 гц .

Исследуя зависимость угла потерь ПТФЭ от температуры, Г. П. Михайлов с сотрудниками обнаружил небольшой температурный максимум $\text{tg } \delta$, лежащий в области низких температур, но смещающийся к нулевой температуре при повышении частоты (рис. 48, в). Для «закаленного» образца (нагретого до 400°С и быстро охлажденного в воде до 20°С), максимум $\text{tg } \delta$ без заметного смещения по температуре возрос по абсолютной величине примерно в 2 раза. Поскольку

в закаленном образце содержание аморфной фазы увеличено, можно думать, что наблюдаемые релаксационные потери происходят в аморфных областях ПТФЭ. Эти потери, очевидно, вызваны наличием каких-то полярных примесей в полимерной цепи ПТФЭ. Изменение характера этих примесей могло привести к разногласиям, указанным выше, по вопросу о тех значениях частоты, при которых наблюдается частотный максимум $\operatorname{tg} \delta$.

Исследования, проведенные Н. А. Родионовой, доказали, что при длительной выдержке в условиях влажности 98% прибыли в весе для образцов ПТФЭ не наблюдается, и угол потерь его практически остается неизменным, сохраняя в пределах частоты $10^2 - 10^8$ гц значения $\operatorname{tg} \delta \approx 1 \div 2 \cdot 10^{-4}$.

В этой работе наличие небольшого максимума $\operatorname{tg} \delta$ обнаружено около 10^7 гц. Нулевая гигроскопичность ПТФЭ и его несмачиваемость водой делает электрические свойства данного диэлектрика весьма устойчивыми в условиях высокой влажности и после выдержки в воде. Коэффициент влагопроницаемости для ПТФЭ так же мал, как у полиэтилена, порядка $2 \div 3 \cdot 10^{-10}$ г/см $\cdot$ ч $\cdot$ тор, а коэффициент диффузии в три раза меньше ($D \approx 3 \cdot 10^{-6}$ см 2 /ч).

Удельное объемное сопротивление ПТФЭ как объемное, так и поверхностное, весьма велико и с трудом поддается измерению. Обычно указываются значения выше $10^{15} - 10^{16}$ ом $\cdot$ см или ом; фактические значения на несколько порядков больше.

Перед тем как перейти к рассмотрению важного вопроса об электрической прочности ПТФЭ, приведем некоторые данные об его неэлектрических свойствах:

Плотность	2,1 — 2,2 г/см 3
Коэффициент линейного расширения при 25—60°C	55 $\cdot$ 10 $^{-6}$ град $^{-1}$
Теплопроводность	0,00243 вт/см $\cdot$ град
Удельная теплоемкость	0,248 кал/град;
Показатель преломления	$n_D^{20} = 1,37 - 1,38$.

Механическая прочность ПТФЭ зависит от степени ориентации. Э. И. Барг указывает, что для неориентированного ПТФЭ временное сопротивление разрыву равно 140—160 кг/см 2 , а для ориентированного 1000—1200 кг/см 2 ; удлинение равно 300—400%. Ш. Т. Абзианидзе при испытании пленок ПТФЭ получил среднее значение 680 кг/см 2 при удлинении 61%. В одной из американских работ приводятся значения $\sigma_p = 105 - 175$ кг/см 2 и удлинение 100—200%; Штегер дает значения 125 кг/см 2 и 300—400%.

По-видимому, указываемые в литературе значения порядка сотен процентов относятся к слабоориентированному материалу. По своим механическим свойствам пленка ПТФЭ ближе подходит к эластичной полиэтиленовой, чем к жесткой полистирольной.

Описанный выше метод получения пленки из ПТФЭ путем строгания и вальцовки дает большую неоднородность электрической прочности, особенно при малых толщинах. В ТУ на такую пленку даже не оговаривается определение пробивного напряжения в один слой, а указываются значения, получаемые при испытании пленки в два слоя. Даже при таком испытании и электро-

дах небольшой площади для тонких пленок могут наблюдаться случаи пробоя при весьма низком напряжении или даже короткое замыкание электродов до подачи напряжения. При этом средние

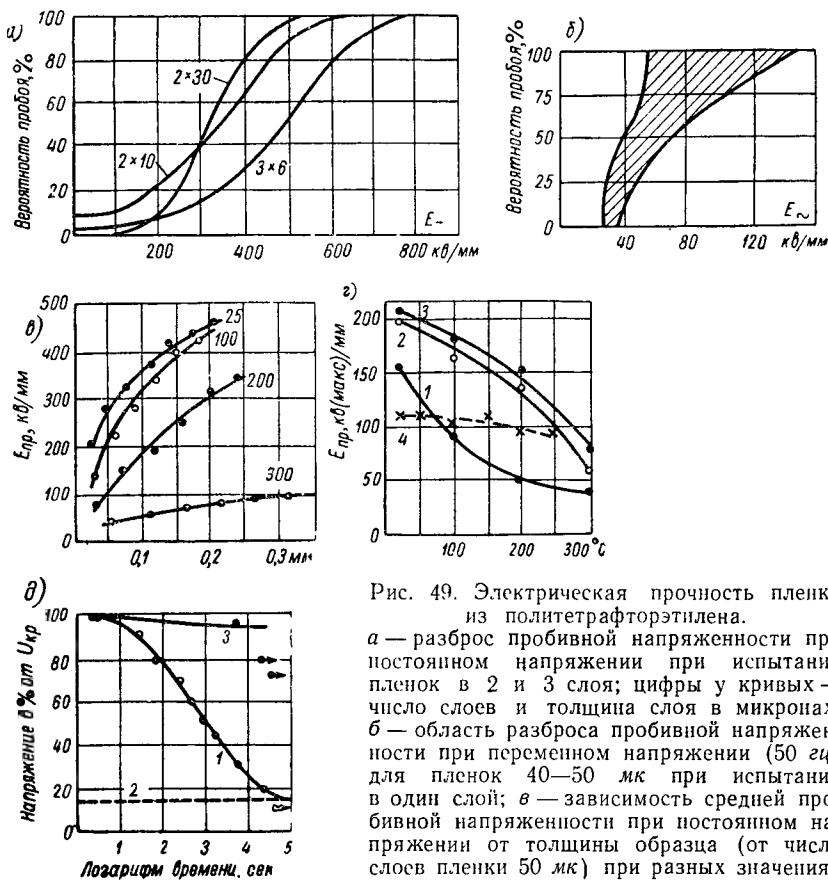


Рис. 49. Электрическая прочность пленки из политетрафторэтилена.

a — разброс пробивной напряженности при постоянном напряжении при испытании пленок в 2 и 3 слоя; цифры у кривых — число слоев и толщина слоя в микронах; *б* — область разброса пробивной напряженности при переменном напряжении (50 гц) для пленок 40—50 мк при испытании в один слой; *в* — зависимость средней пробивной напряженности при постоянном напряжении от толщины образца (от числа слоев пленки 50 мк) при разных значениях температуры; цифры у кривых — температура в град; при определении толщины учтена деформация образцов при нагреве; *г* — зависимость пробивной напряженности при переменном напряжении (амплитудные значения) от температуры при разном числе слоев пленки в образце.

1 — один слой; 2 — два слоя; 3 — от трех до семи слоев; 4 — один слой по данным Абзанидзе.

д — зависимость относительного значения пробивного напряжения образцов пленки на стержнях от времени воздействия напряжения.

1 — воздействие переменного напряжения, 50 гц; 2 — гравида ионизации; 3 — воздействие постоянного напряжения.

значения пробивной напряженности при постоянном напряжении получаются весьма высокими, порядка 250—500 кВ/мм, как показано на рис. 49, *a*, по данным Л. А. Гавартина. Разброс значений пробивной напряженности для нескольких рулонов пленки тол-

щиной 40—50 мк при ее испытании в один слой и при переменном напряжении (50 гц) показан, по данным Ш. Т. Абзианидзе, на рис. 49, б; количество пробоев для каждого рулона было меньше, чем в опытах Гавартина, и толщина пленки выше; поэтому здесь не зарегистрированы нулевые значения $E_{пр}$. Средние значения $E_{пр}$ в данном случае много меньше, чем на рис. 49, а, порядка 40—80 кВ/мм (эффективные значения); это следует объяснять как изменением рода тока, так и испытанием в один слой. Такие же значения $E_{пр}$ указываются в одной из американских работ для тефлоновой ленты.

Влияние температуры на зависимость средних значений пробивной напряженности при постоянном напряжении от суммарной толщины образца, собранного из различного числа слоев пленки ПТФЭ толщиной по 50 мк, показана на рис. 49, в по данным И. Е. Балыгина и К. С. Поровского; цифры у кривых указывают значения температуры. При расчете толщины образца учтено увеличение, связанное с изменением размеров образца при нагреве за счет дезориентации. До 200°С изменение электрической прочности с температурой не так велико; особенно резко снижается $E_{пр}$ при переходе от 200 к 300°С.

На рис. 49, г, по данным тех же авторов, показана зависимость от температуры средних значений пробивной напряженности при переменном токе (50 гц), причем указываются амплитудные значения. Кривые соответствуют различному числу слоев пленки. Для однослойных образцов отмечено резкое снижение $E_{пр}$ с температурой: более чем в 3 раза при переходе от 25 к 200°С. Эти данные находятся в противоречии с пунктирной кривой, полученной на однослойных образцах Ш. Т. Абзианидзе. В американской литературе также можно найти указания, что пробивная напряженность тефлона практически не изменяется в пределах изменения температуры от 25 до 200°С.

При частоте $7 \cdot 10^5$ гц и температуре 25°С И. Е. Балыгин и К. С. Поровский нашли для пленок ПТФЭ (при их испытании в различных жидких средах для ослабления краевого эффекта) значения $E_{пр} \approx 26—47$ кВ/мм. Значения числа слоев, при которых производилось испытание, не указывается.

Все приведенные здесь данные относятся к кратковременному воздействию напряжения. При длительном действии постоянного напряжения электрическая прочность пленки ПТФЭ снижается относительно весьма медленно, тогда как при переменном напряжении технической частоты пробивное напряжение быстро падает, приближаясь к значению напряжения, соответствующего началу ионизации; это наглядно показывает рис. 49, д, взятый из работы Ш. Т. Абзианидзе.

Резкое снижение электрической прочности ПТФЭ при длительном действии переменного напряжения обусловлено низкой коррозийностью этого материала, отмечаемой как отечественными, так и зарубежными исследователями. Если выше мы приводили значения срока жизни образцов полистирола и полиэтилена при

напряженности 24 кВ/мм (50 гц) и воздействии короны у края электрода, составлявшие порядка десятков часов, то в этих же условиях для политетрафторэтилена срок жизни снижается до нескольких часов.

Высокая химическая стойкость ПТФЭ должна была бы обеспечить повышенную устойчивость этого материала к активным продуктам разложения воздуха в условиях короны: озону и окислам азота. Действительно, опыты, проведенные Г. С. Каминским, показали, что при выдержке образцов полистирольной и политетрафторэтиленовой пленки в эксикаторе, содержащем озон или окислы азота, вместе с озоном (непосредственное воздействие разрядов на испытуемые пленки в этих опытах было исключено) изменения механических и электрических свойств полистирольной пленки оказывается значительно более заметным, чем пленки ПТФЭ (рис. 50). Таким образом, для полифторэтилена оказывается опас-

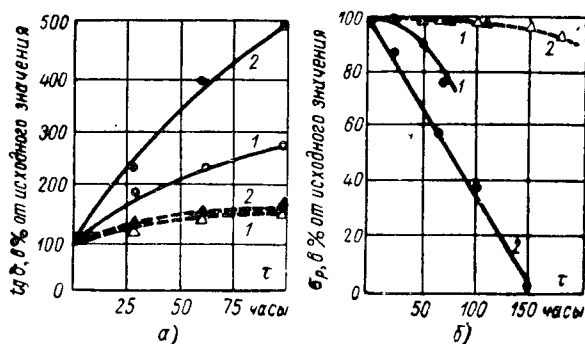


Рис. 50. Измерение электрических и механических свойств полистирольной пленки (сплошные линии) и фторопластовой пленки (пунктир) от времени пребывания в атмосфере озона (1) и озона совместно с окислами азота (2).

ным прежде всего непосредственное воздействие разрядов. По предложению М. М. Михайлова и Лю Цзы-юй малую стойкость ПТФЭ по отношению к разрядам можно объяснять большим сродством галоидов, в данном случае фтора, к электронам. При захвате электронов образуются ионы фтора, что связано с освобождением значительных количеств энергии, способствующих быстрому разрушению ПТФЭ.

По данным Уикса и Биндера, облучение потоком тепловых нейтронов вызывает значительно более быстрое разрушение ПТФЭ в сравнении с полиэтиленом или полистиролом, о чем можно судить по возрастанию $tg \delta$, показанному на рис. 51.

Таким образом, при разработке конденсаторов переменного напряжения из пленки ПТФЭ надо уделять особенное внимание вопросу об исключении возможности развития в них ионизационных процессов еще в большей степени, чем для случая пленок из других неполярных полимеров.

Отмеченная выше неоднородность электрической прочности пленки ПТФЭ, полученной методом строгания и вальцовки, по-видимому, связана прежде всего с наличием в ней сквозных отверстий. Сугита, Нагама и Торияма, проверявшие электрическую

прочность пленки толщиной 55 мк до и после термической обработки, способствовавшей затягиванию части сквозных отверстий, нашли, что среднее пробивное напряжение повысилось после такой обработки на 20%, а разброс значений заметно снизился.

Заметное повышение электрической прочности можно получить, радикально изменяя технологию изготовления пленки. Для этой цели применяется метод отливки суспензии ПТФЭ в жидкой среде на движущуюся гладкую ленту с последующей сушкой и спеканием полученного тонкого слоя. Нанося последовательно несколько слоев, можно обеспечивать перекрытие слабых мест и значительное повышение однородности пленки. По данным Мистича, при толщине такой пленки, равной 25 мк, можно получить значение электрической прочности в 5—10 раз выше, чем при обычном методе изготовления пленки. Эти данные, очевидно, относятся к испытанию пленки в один слой, когда особенно сильно сказывается влияние слабых мест.

Недостатком этого метода является то, что при отсутствии дополнительной обработки пленка получается неориентированной или очень слабо ориентированной, что исключает возможность успешного проведения запекания намотанных секций и затрудняет получение достаточной стабильности емкости.

В США, кроме чисто политетрафторэтиленовой пленки, изготавливают также пленочные материалы, представляющие собой сочетание ПТФЭ и стекловолокна. Такие пленки могут быть получены путем пропитки стеклоленты суспензией ПТФЭ или путем введения

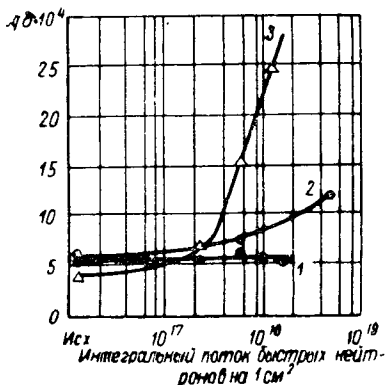


Рис. 51. Изменение угла потерь непolarных полимеров под действием облучения потоком быстрых нейтронов.

1 — полистирол; 2 — полиэтилен; 3 — политетрафторэтилен.

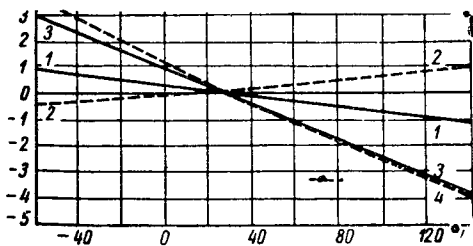


Рис. 52. Влияние введения стеклянного микроволокна в тефлоновую пленку на температурную зависимость емкости пленочных конденсаторов.

1 — непропитанный тефлон: $\text{TKE} = -110 \cdot 10^{-6}$; 2 — непропитанный тефлон с добавкой стекловолокна: $\text{TKE} = +55 \cdot 10^{-6}$; 3 — пропитанный тефлон: $\text{TKE} = -350 \cdot 10^{-6}$; 4 — пропитанный тефлон с добавкой стекловолокна: $\text{TKE} = -375 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$.

введения стеклянного микроволокна в качестве наполнителя в пленку ПТФЭ, полученную отливкой из суспензии. Влияние введения стекловолокна в тефлоновую пленку на температурную зависимость емкости, по данным Мистича, показано на рис. 52. Комбинация

из стекловолокна с тефлоном дает меньшее изменение емкости с температурой, причем ТКЕ меняет свой знак и приобретает положительные значения. При пропитке конденсаторов кремний-органической (силиконовой) жидкостью это различие практически исчезает.

Тонкие пленки ПТФЭ, нанесенные из суспензии на алюминиевую фольгу, могут применяться вместе с этой фольгой, используемой в качестве одной из обкладок конденсатора. В этом случае удастся получить толщины пленки до 1,5 мк. Однако этот вопрос мы рассмотрим ниже, так как такой тип конденсатора уже может быть отнесен к тонкопленочным конденсаторам (глава четвертая).

§ 9. Конденсаторы с диэлектриком из пленки политетрафторэтилена (фторопластовые)

Применение пленки ПТФЭ для изготовления конденсаторов позволило сделать качественный скачок в деле повышения耐热ности намотанных конденсаторов, увеличив верхний предел рабочей температуры практически в 2 раза. Однако это было достигнуто за счет резкого повышения цены конденсаторов в связи с высокой стоимостью пленки ПТФЭ. А потому такие конденсаторы применяются сейчас преимущественно в специальной аппаратуре, когда требуется увеличение рабочей температуры до верхнего предела, гарантируемого для пленки ПТФЭ независимо от требования к электрическим характеристикам, или когда требуется конденсатор с характеристиками, близкими к полистирольному, но с более высокой рабочей температурой, хотя бы и не достигающей предельного значения, характерного для ПТФЭ.

Еще недавно конденсаторы этого типа изготавливались только в СССР и в США. Теперь производство их постепенно осваивается и в других странах, в ряде случаев на импортной пленке.

В СССР конденсаторы из пленки ПТФЭ обычно называют «фторопластовыми». Этого термина мы и будем придерживаться, хотя он не совсем точен, поскольку, кроме фторопласта-4 (ПТФЭ), у нас изготавливается и фторопласт-3 (полимонохлортрифторэтилен). Однако последний, хотя и был опробован для производства конденсаторов, не нашел себе применения; поэтому можно применять выражение «фторопластовые конденсаторы», подразумевая, что они изготовлены только из одного определенного фторопласта, а именно: фторопласта-4 или ПТФЭ. В отдельных случаях, говоря о зарубежной продукции, мы иногда будем применять американский термин: «тефлоновые конденсаторы».

За последние годы в СССР освоен ряд типов пленочных фторопластовых конденсаторов: ФТ — фторопластовые термостойкие, ФГТИ — фторопластовые герметизированные в изолированном корпусе, ФД — фторопластовые дозиметрические (см. § 1) и ФТЧ — фторопластовые частотные.

При намотке фторопластовых конденсаторов, так же как и в случае полиэтиленовых, приходится сталкиваться с эластичностью пленки, отсутствующей у пленки полистирола и вносящей некоторые осложнения в намотку. Так же, как и при намотке конденса-

торных секций из других пленок с высоким поверхностным сопротивлением, возникает опасность поверхностной электризации пленки и стремление ее захватывать частички пыли из окружающей среды.

В качестве обкладок в производстве фторопластовых конденсаторов применяют преимущественно только металлическую фольгу (алюминиевую); в этом случае, с учетом наличия воздушных зазоров, эффективное значение ϵ , по данным Мистича, можно принимать равным 1,70.

Металлизация фторопласта представляет значительные трудности ввиду особенности его поверхности, на которой не закрепляются обычные металлические слои. Разрабатываются специальные методы обработки поверхности, позволяющие металлизировать фторопласт, но они осложняют технологию и приводят к некоторому ухудшению электрических свойств диэлектрика. Поэтому, хотя в рекламе некоторых фирм США сообщалось о выпуске металлизированных тефлоновых конденсаторов, обычным типом все же остается конденсатор с обкладками из фольги.

После намотки секций, так же как и в случае полистирольных конденсаторов, проводится операция запекания для стабилизации емкости, но при значительно более высокой температуре, примерно в 2 и даже более раза превышающей те значения температуры, которые используют в случае полистирола (порядка 220—250°С). После запекания полезно дать конденсаторам несколько температурных циклов при крайних значениях температуры, чтобы дополнительно улучшить стабильность емкости.

В конструкции фторопластовых конденсаторов, учитывая высокий верхний предел их рабочей температуры, следует избегать пайки, особенно мягкими припоями, а прибегать к сварке.

Высокая влагостойкость пленки ПТФЭ в принципе позволяет отказываться от герметизации конденсаторов, так как их электрические свойства должны быть достаточно устойчивы в условиях высокой влажности без специальной добавочной влагозащиты. Однако обычное конструктивное оформление фторопластовых конденсаторов предусматривает использование металлического корпуса, в основном, для защиты мягкой и эластичной пленки от механических повреждений.

Часто в этом случае применяют алюминиевый трубчатый корпус с торцевыми шайбами из листового фторопласта, закрепляемыми путем закатки краев корпуса (рис. 53, а). Выводы могут быть как в виде проводников или контактных лепестков, так и в виде выводных болтиков, закрепленных на фторопластовых торцевых шайбах. В этом случае присоединение конденсаторов в схему может быть осуществлено затягиванием гайки на выводном болтике и не требует применения пайки, которая может быть недопустимой при высокой рабочей температуре, на которую рассчитан конденсатор.

В практике США часто применяют стеклянные корпуса в виде трубок с металлизированными торцами, на которых монтируются

металлические торцевые колпачки с выводными болтиками (рис. 53, б). Эта конструкция обычно используется для конденсаторов с повышенным рабочим напряжением, пропитанных кремний-органической жидкостью. В СССР аналогичная конструкция выполняется с применением керамических трубок, армированных на торцах переходными коваровыми кольцами, соединяемыми с керамическим корпусом через слой стекла (рис. 53, в); вместо пропитки жидкостью производится заполнение конденсатора сжатым азотом.

Конденсаторы низкого напряжения большой емкости собираются также иногда из плоских секций в герметизированных корпусах прямоугольной формы с керамическими изоляторами, как в случае полистирольных конденсаторов аналогичного типа (см. рис. 25, в).

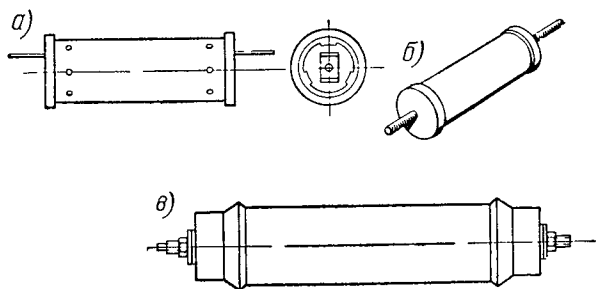


Рис. 53. Конденсаторы с диэлектриком из пленки политетрафторэтилена: а — тип ФТ; б — американский тип TSG; в — тип ФГТИ.

Следует отметить, что в связи с высокой влагостойкостью ПТФЭ даже для негерметизированных конденсаторов отечественные технические условия обычно гарантируют работу при относительной влажности 98% за исключением тех случаев, когда от таких конденсаторов требуется особо высокое сопротивление изоляции (например, при их использовании для целей дозиметрии).

Нижний предел рабочей температуры для конденсаторов с диэлектриком из пленки ПТФЭ обычно указывается равным $-50 \div -60^\circ\text{C}$, в соответствии с пожеланиями заказчиков. По-видимому, если требуется, его можно еще снизить до значений порядка $-70 \div -80^\circ\text{C}$. Верхний предел и у нас и у зарубежных фирм обычно указан равным 200°C для конденсаторов низкого напряжения и 150°C для конденсаторов высокого напряжения. Отдельные зарубежные фирмы в редких случаях повышают эти значения соответственно до 250 и 200°C , но при этом оговаривается необходимость снижения рабочего напряжения по отношению к номинальному значению. С другой стороны, для негерметизированных конденсаторов некоторые фирмы указывают рабочую температуру всего лишь 85°C .

Номинальная емкость конденсаторов из пленки ПТФЭ лежит

в пределах от нескольких сотен пикофарад до 0,1—1 мкф. Допускаемое отклонение емкости от номинала обычно увеличено в сравнении с полистирольными конденсаторами: для отечественных конденсаторов, в основном, допуск по емкости ± 10 и 20%; в отдельных случаях до $\pm 5\%$.

Зависимость емкости конденсаторов рассматриваемого типа от температуры показана на рис. 54, а, по данным М. М. Аснина и Е. И. Михайловой (кривые 1 и 2) и по данным Козенса (кривая 3). Для отечественных образцов эта зависимость близка к прямой: в интервале 20—200°C: в этом интервале $\text{ТКЕ} = -110 \div -120 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$; для кривой 3 в интервале 20—120°C получено

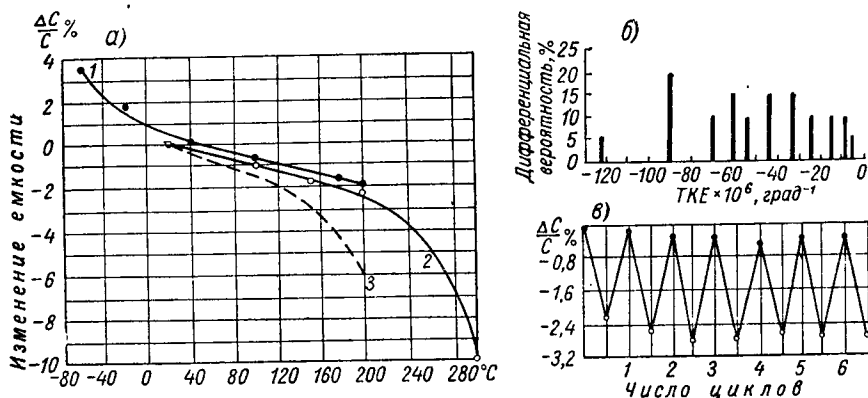


Рис. 54. Стабильность емкости политетрафторэтиленовых конденсаторов:

а — зависимость емкости от температуры.
1 и 2 — фторопластовые конденсаторы (результаты двух серий измерений на разных образцах); 3 — тефлоновый конденсатор;
б — разброс значений ТКЕ для фторопластовых конденсаторов цилиндрического типа;
в — необратимые изменения емкости фторопластового конденсатора при воздействии температурных циклов; 20+200+20°C; черные кружки — измерения при 20°C, а белые — при 200°C.

значение $\text{ТКЕ} = -200 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Расширение интервала температуры в сторону ее повышения дает резкое отклонение от линейности и заметное возрастание абсолютного значения ТКЕ.

В зарубежных рекламных данных можно найти самые разнообразные значения ТКЕ для тефлоновых конденсаторов, начиная от $-50 \cdot 10^{-6}$ до $-400 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. В наших технических условиях указаны большие допустимые колебания ТКЕ, порядка $\pm 200 \div 300 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, поскольку фторопластовые конденсаторы лишь недавно вышли из стадии лабораторно-серийного выпуска. Видимо, по мере накопления производственного опыта удастся ужесточить требования к величине ТКЕ в тех случаях, где это будет необходимо.

При тщательном изготовлении конденсаторов разброс величины ТКЕ может быть не очень большим, как показывают данные рис. 54, б, полученные Г. Р. Демиденко, Е. Б. Кравчинской и М. К. Чесновой. В данном случае значения ТКЕ уложились в пределы от 0 до $-150 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Иногда наблюдаются также не-

большие положительные значения ТКЕ. Поскольку ϵ политетрафторэтилена заметно снижается при нагревании (рис. 48, *a*), возможность получения близких к нулю или даже положительных значений ТКЕ может быть обусловлена только изменением геометрических размеров. Расширение обкладок относительно невелико и не может полностью компенсировать снижение емкости за счет уменьшения ϵ ; по-видимому, в данном случае должно играть роль некоторое уменьшение толщины пленки за счет ее эластичности при возникновении в конденсаторе сжимающих усилий в процессе его нагрева.

Стабильность емкости во времени и при воздействии термических циклов в случае политетрафторэтиленовых конденсаторов несколько хуже, чем для полистирольных конденсаторов; однако, как показывают данные М. М. Аснина и Е. И. Михайловой на рис. 54, *a*, при правильном режиме запекания можно получать относительно хорошую стабильность; в данном случае после первых двух циклов изменения емкости при колебаниях температуры стабилизируются и результаты измерения как при 20, так и при 200°С воспроизводятся с точностью порядка нескольких десятых процента.

По величине коэффициента абсорбции политетрафторэтиленовые конденсаторы не уступают полистирольным: американские данные для тефлоновых конденсаторов дают k_a порядка 0,02% и меньше. Однако после пропитки, как указывает Мистич, коэффициент абсорбции резко возрастает и может достигать 2,5%. По отечественным данным для непропитанных конденсаторов величина k_a обычно лежит в пределах 0,01—0,10%.

Угол потерь конденсаторов из пленки ПТФЭ весьма мал в тех условиях, когда его величина определяется в первую очередь диэлектрическими потерями. В рекламных данных зарубежных фирм обычно указываются значения $\operatorname{tg} \delta = 2\text{--}3 \cdot 10^{-4}$; впрочем одна из американских фирм, оговаривая условия измерения (частоту и температуру), приводит более высокие значения: $5 \cdot 10^{-4}$ при 70°С и $10 \cdot 10^{-4}$ при 150°С (1 Мгц), отмечая, что значения $2\text{--}3 \cdot 10^{-4}$ относятся к комнатной температуре и частоте 60 гц. Отечественные ТУ обычно оговаривают значения не более $10 \cdot 10^{-4}$ при комнатной и $15 \cdot 10^{-4}$ при максимальной рабочей температуре, но для конденсаторов типа ФТЧ снижают эти величины соответственно до $5 \cdot 10^{-4}$ и $8 \div 10 \cdot 10^{-4}$. Фактические величины $\operatorname{tg} \delta$ лежат ниже этих предельных значений, как показывают данные М. М. Аснина и Е. И. Михайловой на рис. 55, *a*. С повышением частоты начинается возрастание угла потерь за счет роста потерь в металлических частях конденсатора так же, как и в случае полистирольных конденсаторов. Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от частоты, по данным Мистича, для двух тефлоновых конденсаторов показана на рис. 55, *b*.

Уменьшение потерь в металле, как и в случае полистирольных конденсаторов, может быть получено применением намотки с выступающей фольгой и тщательным контактированием, снижающим потери в переходных контактах.

Постоянная времени политетрафторэтиленовых конденсаторов весьма велика, так же как в случае полистирольных конденсаторов, как показывает рис. 55, в. При комнатной температуре для тщательно изготовленных конденсаторов постоянная времени составляет 10^5 — 10^6 ом·ф; при верхнем пределе рабочей температуры 200°C она лежит выше 100 ом·ф, а во многих случаях даже

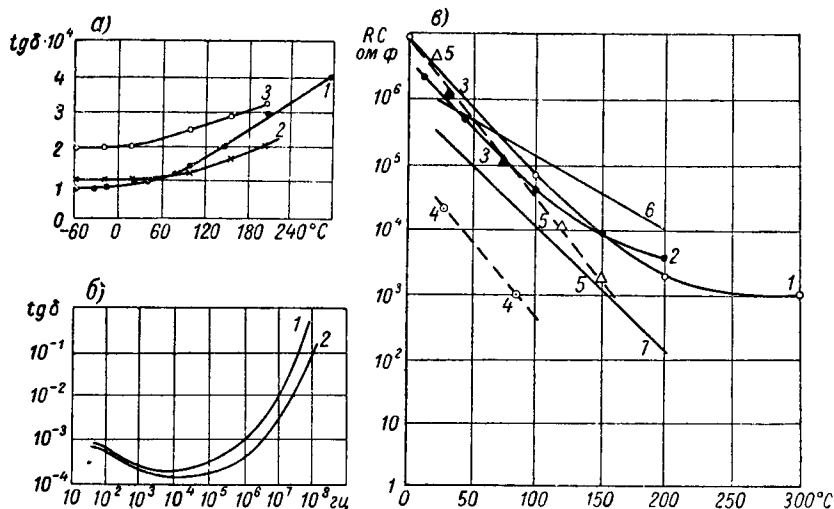


Рис. 55. Угол потерь и постоянная времени политетрафторэтиленовых конденсаторов:

а — зависимость угла потерь от температуры для трех фторопластовых конденсаторов.

1 — частота не указана; 2 — при частоте 1 МГц , емкость 8200 пф ; 3 — при частоте 1 кГц , емкость 0.1 мкф ;

б — зависимость угла потерь тефлоновых конденсаторов от частоты при комнатной температуре.

1 — рабочее напряжение 24 кВ , диаметр корпуса 40 мм ; 2 — рабочее напряжение 6 кВ , диаметр корпуса 30 мм .

в — зависимость постоянной времени от температуры.

1 и 2 — фторопластовые конденсаторы; 3 — тефлоновые непропитанные (Мистич); 4 — тефлоновые пропитанные (Мистич); 5 — тефлоновые по данным различных американских фирм; 6 — тефлоновые английские (Козенс).

выше 1000 ом·ф. Эти данные относятся к непропитанным конденсаторам; пропитка кремний-органической жидкостью, по данным Мистича (кривая 4 на рис. 55, в), дает резкое ухудшение постоянной времени.

Большая постоянная времени особенно важна для дозиметрических конденсаторов (см. § 1). При высоких значениях этой характеристики ее обычно оценивают по скорости саморазряда. Для отечественных дозиметрических конденсаторов типа ФД оговаривается, что скорость саморазряда конденсатора как до облучения, так и после его облучения от источника гамма-лучей дозой 200 рентген, не должен превышать за 24 ч : а) при 20°C для емкостей 390 — 500 пф — 2% , а для емкости 100 пф — 4% ; б) при 60°C для емкостей 390 — 500 пф — 4% , а для емкости 100 пф — 6% . Потеря напряжения за 24 ч , соответственно равная 2.4 и 6% , отвечает значениям постоянной времени: $3.75 \cdot 10^6$, $2.2 \cdot 10^6$ и $1.45 \cdot 10^6 \text{ сек}$ (или ом·ф).

Эти данные получены для непропитанных конденсаторов, подвергаемых особой обработке для повышения их постоянной времени и уменьшения ее изменений под влиянием облучения.

При постоянном напряжении политетрафторэтилен весьма устойчив (см. рис. 49, д) и допускает работу при повышенных значениях напряженности поля более высоких, чем в случае полистирола. По данным Мистича, при использовании диэлектрика из нескольких слоев пленки при температуре 125°С допустима напряженность поля 40 кВ/мм; М. М. Аснин и Е. М. Михайлова указывают для небольших емкостей с многослойным диэлектриком еще более высокие значения: до 70 кВ/мм при 150°С. Как и в случае полистирола, высокое удельное сопротивление пленки ПТФЭ обеспечивает резкое снижение опасности электрохимического старения при постоянном токе; эластичность пленки уменьшает опасность появления дефектов за счет механических повреждений пленки, имеющих место в случае жесткой полистирольной пленки.

Однако применение обычной пленки ПТФЭ в один слой практически невозможно из-за неизбежного наличия в ней слабых мест; Мистич оговаривает такую возможность, но лишь для пленки, полученной из суспензии или же содержащей наполнитель в виде стекловолокна.

При относительно больших емкостях даже два слоя пленки не обеспечивают достаточно большой надежности, и желательно брать пленку в три слоя. Это дает при относительно небольших напряжениях значительно меньшие напряженности поля, чем было указано выше: при толщине диэлектрика 3×5 мк и напряжении 200 в имеем 13,3 кВ/мм, при толщине 3×10 мк и 600 в — 20 кВ/мм и при толщине 4×10 мк и 1000 в — 25 кВ/мм. Эти цифры соответствуют емкостям порядка 0,25—0,5 мкф и рабочей температуре до 200°С.

При высоком напряжении постоянного тока и наполнении сжатым азотом при емкостях до 0,05—0,1 мкф конденсаторы собирают из последовательно соединяемых секций из расчета до 2—5 кВ напряжения на одну секцию. При диэлектрике в одной секции 4×30 мк и рабочей температуре до 150°С, по-видимому, допустима напряженность до 40—45 кВ/мм.

В данном случае последовательное соединение секций позволяет уменьшить толщину диэлектрика в секции до оптимального значения, соответствующего наивыгоднейшей кратковременной прочности, и получить уменьшение ширины закраины, которая рассчитывается на рабочее напряжение секции, а не на полное рабочее напряжение всего конденсатора.

При цилиндрической форме конденсатора удобно наматывать секции на одну и ту же оправку, обрывая в нужных местах ленты фольги, чтобы разъединить секции друг от друга. При этом надо иметь в виду, что при неправильном размещении выводных контактов индуктивность конденсатора может резко возрасти. Неправильное и правильное расположение выводов в четырехсекционном конденсаторе показано на рис. 56. Штрихованные треуголь-

ники показывают распределение тока в фольге: в случае рис. 56 а, в отличие от рис. 56, б, токи в обкладках противоположного знака не равны, компенсации магнитных полей токов обоих обкладок не происходит и индуктивность оказывается увеличенной.

Для конденсаторов с последовательными секциями при переменном напряжении требуется, чтобы напряжение, приходящееся на одну секцию, не превосходило напряжения начала ионизации $U_{и}$ (ионизирующее напряжение). Увеличение толщины диэлектрика в данном случае дает относительно малый выигрыш в величине $U_{и}$ (рис. 57, а, данные Ш. Т. Абзанидзе для образцов пленки, намотанных на медный стержень с верхним электродом из фольги); так же, как это было показано для полистирольных конденсаторов (рис. 39, б), резкое повышение $U_{и}$ можно получить путем пропитки (точнее, заливки) конденсаторной секции жидким диэлектриком. В случае пленки ПТФЭ обычные электроизоляционные жидкости типа нефтяного масла непригодны, так как их нагревостойкость много ниже, чем у пленки, и будет снижать допускаемую рабочую температуру конденсатора в целом.

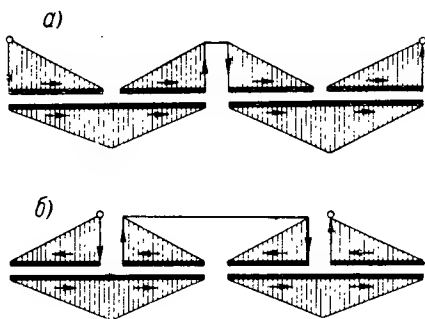


Рис. 56. Схема присоединения выводов к обкладкам четырехсекционного намотанного конденсатора: а — неправильно; б — правильно (малая индуктивность).

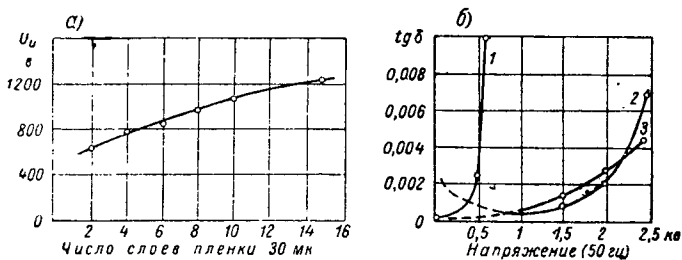


Рис. 57. Ионизация во фторопластовых конденсаторах. а — зависимость ионизирующего напряжения (50 Гц) от числа слоев пленки 30 мкм между электродами (увеличение толщины диэлектрика в 7—8 раз повышает $U_{и}$ примерно в 2 раза; б — зависимость угла потерь фторопластовых секций при частоте 50 Гц от напряжения. 1 — секция на воздухе; 2 — секция в жидкости калория-2; 3 — секция в сжатом азоте (5 ат).

Поэтому для заливки высоковольтных политетрафторэтиленовых конденсаторов в США применяют кремний-органические жидкости. Опыты по применению аналогичной отечественной жидкости калория-2 для заливки фторопластовых конденсаторов проводились М. М. Асниным и Е. И. Михайловой и дали возможность значительно повысить величину $U_{и}$, как показано на рис. 57, б.

Такой же эффект дает применение сжатого азота. При разботке конденсаторов типа ФГТИ азоту было отдано предпочтение перед жидкой заливкой по ряду соображений (уменьшением $\text{tg} \delta$ за счет отсутствия междуслойной поляризации, устранение необходимости усложнять конструкцию введением компенсаторов расширения жидкости при нагреве и т. п.).

Учитывая опасность ионизации при переменном, а также при импульсном напряжении, допустимые значения напряжений этого вида для конденсаторов типа ФГТИ заметно снизили по сравнению с номинальным постоянным напряжением, как показано на рис. 58. Напряжение на одну секцию при частоте 50 гц обычно принимают в таких конденсаторах до 1 кв.

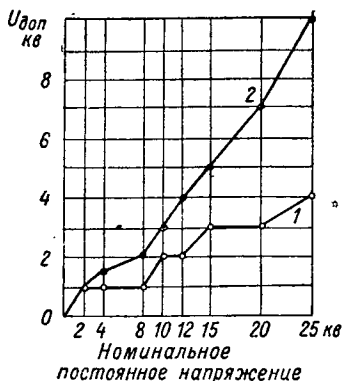


Рис. 58. Зависимость допустимого значения переменного составляющей при частоте 50 гц (эфф.) (кривая 1) и допустимого импульсного напряжения частотой до 1000 гц (кривая 2) от номинального постоянного напряжения для конденсаторов типа ФГТИ.

Для односекционных непротитанных конденсаторов полная гарантия в отсутствии ионизации может быть обеспечена, если величина их рабочего переменного напряжения будет лежать ниже минимального пробивного напряжения для воздуха, которое, как уже указывалось выше, составляет около 250 в (эфф.). Такую величину переменного напряжения можно прикладывать к конденсаторам при частотах до нескольких сотен герц, когда еще не сказывается нагрев конденсатора за счет потерь энергии. При более высоких частотах напряжения приходится снижать с таким расчетом, чтобы обеспечить допустимый перегрев конденсатора с учетом температуры окружающей среды. В общем здесь применимы те же соображения, что и при

использовании полистирольных конденсаторов в цепи переменного тока, с тем лишь различием, что фторопласт-4 еще больше боится воздействия ионизации, чем полистирол, но зато имеет перед ним преимущество в смысле резко повышенного значения допускаемой температуры.

Испытательное напряжение постоянного тока для фторопластовых конденсаторов с повышенным напряжением обычно принимают равным $1,5 U_{\text{ном}}$, учитывая относительно высокие значения $E_{\text{раб}}$. Для некоторых типов конденсаторов низкого напряжения применяется значение $2U_{\text{ном}}$. В табл. 8 дано сравнение объемов при разных значениях номинальной емкости и низком напряжении (200—600 в) для фторопластовых, полистирольных, фольговых и бумажных конденсаторов, по данным М. М. Аснина и Е. И. Михайловой (1957 г.). Значения ϵ полистирола того же порядка, что и у фторопласта-4, но величина $E_{\text{раб}}$ заметно ниже, а потому для полистирольных конденсаторов объем значительно повышен.

Фторопластовые конденсаторы по величине $E_{\text{раб}}$ приближаются к бумажным, но значение ϵ для пропитанной бумаги в 2,5 раза выше, чем у фторопласта, а потому объем у бумажных конденсаторов заметно уменьшен. Следует иметь, однако, в виду, что в данном случае сравнения взят объем бумажных конденсаторов КБГ с верхним пределом рабочей температуры 70°C . Если взять более нагревостойкие конденсаторы БГТ, рассчитанные на $85\text{--}100^\circ\text{C}$ (т. е. все же еще сильно уступающие фторопластовым по нагревостойкости), то различие в объеме по сравнению с фторопластовыми будет уменьшено, так как с повышением рабочей температуры значение $E_{\text{раб}}$ для пропитанной бумаги приходится снижать.

Таблица 8

Сравнение объема некоторых типов намотанных конденсаторов

Номинальные данные		Объем, см ³		
Напряжение, в	Емкость, мкф	Фторопластовые	Полистирольные	Бумажные
200	0,001	0,36	—	0,7
200	0,01	1,0	6,0	—
200	0,1	14,0	63,0	6,0
200	0,5	85	200	40
600	0,001	0,65	—	1,0
600	0,01	3,6	13,5	3,0
600	0,05	14	63	7,0
600	0,25	85	—	40

Высоковольтный фторопластовый конденсатор типа ФГТИ на 15 кВ и 0,01 мкф имеет диаметр 51 мм и длину 126 мм (объем 258 см³), а аналогичный ему бумажный конденсатор типа КБГ-Ц имеет диаметр 50 мм и длину 145 мм (объем 284 см³); конденсатор ФГТИ на 4 кВ и 0,1 мкф имеет диаметр 51 мм и длину 126 мм (те же 258 см³), а аналогичный ему конденсатор КБГ-Ц имеет диаметр 50 мм и длину 80 мм (объем 157 см³).

Таким образом, при высоком рабочем напряжении фторопластовые конденсаторы догоняют бумажные по величине объема за счет дополнительного повышения $E_{\text{раб}}$ для многослойного диэлектрика; в этом случае бумага сохраняет некоторое преимущество по объему только при верхних значениях диапазона емкостей.

Резкое различие в стоимости фторопластовых и бумажных конденсаторов позволяет ставить вопрос о применении фторопластового конденсатора взамен бумажного только в тех случаях, когда требуется обеспечить, при заданных номинальных данных, резкое повышение допускаемой температуры, которое не может дать пропитанная бумага, или получить такое улучшение угла потерь или коэффициента абсорбции, которое бумага не может обеспечить,

будучи по своей природе полярным материалом. Однако во втором случае обычным заменителем бумаги является полистирол, такой же, как и фторопласт, неполярный диэлектрик; применение фторопласта и в этом случае может стать необходимым только тогда, когда нагревостойкость полистирола окажется недостаточной, или если решающую роль будет играть сниженный объем фторопластового конденсатора в сравнении с полистирольным.

При оценке возможности применения фторопластового конденсатора нельзя ограничиваться только оценкой объемов конденсаторов; в ряде случаев надо учесть также и их веса, так как резко увеличенный удельный вес фторопласта может сыграть отрицательную роль.

Высокая цена ограничивает возможности применения фторопластовых конденсаторов и заставляет всякий раз внимательно взвешивать все достоинства этого интересного типа намотанных конденсаторов для того, чтобы принять окончательное решение об его использовании.

§ 10. Проблема получения неполярного или слабополярного диэлектрика с повышенной нагревостойкостью

Несмотря на то, что конденсаторы с диэлектриком из неполярных пленок уже получили значительное распространение в современной технике и производство их ведется в достаточно широких масштабах во многих странах, используя не один, а несколько типов пленок неполярного типа,— проблема получения неполярной или слабополярной пленки с малыми диэлектрическими потерями для производства конденсаторов еще не может считаться полностью решенной.

В настоящее время, как уже говорилось, в конденсаторостроении применяются пленки, изготавливаемые из следующих неполярных материалов: полистирол, сополимеры полистирола, полиэтилен и политетрафторэтилен. Ни один из этих материалов не является полностью удовлетворительным, с точки зрения конденсаторостроения, по своим технико-экономическим показателям.

Полистирол, обеспечивающий весьма высокие электрические свойства (если не считать не вполне удовлетворительной электрической прочности в готовых конденсаторах) имеет явно недостаточную нагревостойкость для многих случаев применения конденсаторов. Сополимеры стирола обеспечивают некоторое повышение нагревостойкости, но относительно небольшое и притом за счет некоторого ухудшения электрических свойств, в частности, небольшого повышения угла потерь, поскольку для сополимеризации обычно применяют слабополярные вещества. Кроме того, стоимость сополимеров должна быть выше стоимости чистого полистирола, так как технология производства усложняется.

Полиэтилен позволяет получить заметное улучшение нагревостойкости конденсаторов, особенно при использовании облучения для получения поперечных связей между полимерными молеку-

лами. Однако по электрическим свойствам, особенно по величине ТКЕ, полиэтиленовые конденсаторы хуже полистирольных.

Политетрафторэтилен (фторопласт-4, тефлон) позволяет получить конденсаторы, по электрическим свойствам близкие к полистирольным, но с резко повышенной нагревостойкостью, до 200°C , что раньше считалось недостижимым для конденсаторов с органическим диэлектриком. Вместе с тем улучшение качества конденсаторов при использовании этого диэлектрика достигается за счет резкого повышения их стоимости, что характерно как для наших условий, так и для зарубежных. В качестве примера полезно привести цены на пленочные неполярные материалы, по американским данным 1961 г.: полистирол — 0,215 долл/фунт, полиэтилен — 0,275 долл/фунт и тефлон — 11,6 долл/фунт. При этом следует учитывать высокий удельный вес тефлона, который дает дополнительно почти удвоение цены за 1 м^2 пленки в сравнении с другими материалами. Эти цены соответствуют исходным продуктам; при их переработке в пленку малой толщины цена возрастает; так, тефлоновая пленка стоит уже 15 долл/фунт.

а. Тефлон FEP. Новым фторированным диэлектриком, разработанным за рубежом, является «тефлон FEP» представляющий собой фторированный сополимер этилена и пропилена. По данным Тэрнера, его нагревостойкость выше 200°C , плотность $2,15\text{ г/см}^3$, $\epsilon=2,1$, $\text{tg}\delta=0,0002$ при 60 гц и удельное объемное сопротивление выше $10^{17}\text{ ом}\cdot\text{см}$; пробивная напряженность 160 кв/мм . Этот новый материал, видимо, имеет некоторые технологические преимущества перед обычным тефлоном (ПТФЭ), но едва ли его стоимость будет значительно снижена.

Приведенные здесь данные показывают желательность получения новых неполярных или хотя бы слабополярных материалов, которые сочетали бы высокие электрические свойства с высокой нагревостойкостью и относительно небольшой стоимостью.

б. Метил-производные стирола. Органический материал с повышенной нагревостойкостью можно искать среди полимеров, содержащих бензольные или сдвоенные бензольные кольца в структуре молекулы. С этой точки зрения и полистирол должен был бы обладать достаточной нагревостойкостью. Действительно, когда удалось получить этот материал в кристаллическом виде за счет использования принципа изотактической полимеризации, о котором мы подробнее скажем ниже, то оказалось, что его температура плавления достигает 230°C . В обычных же условиях полистирол получается в аморфном состоянии, с низкой температурой размягчения. Представляло бы большой интерес иметь изотактический полистирол в пленочной форме, но эта задача еще не решена.

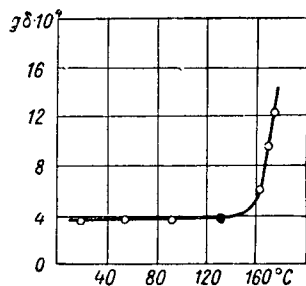
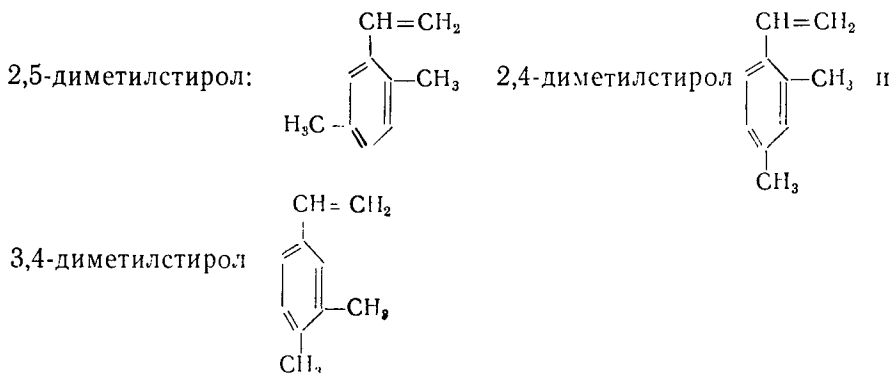


Рис. 59. Зависимость угла потерь полимера 2,5-метилстирола от температуры.

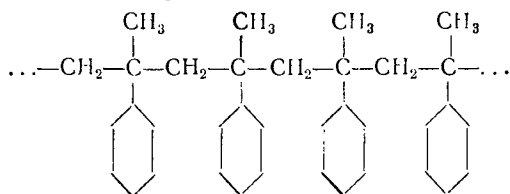
С меньшими затруднениями можно получить повышенную нагревостойкость, используя метил-производные стирола. В случае диметилстирола можно иметь три изомерные модификации:



Все они — жидкие вещества, для которых значения коэффициента преломления соответственно составляют: 1,5396, 1,5405 и 1,5466. Температура кипения (при давлении 1—2 *torr*) для первого и третьего изомера порядка 150° С, а для второго — порядка 75—76° С.

Работа, проведенная М. М. Котоном с сотрудниками, показала, что из этих изомеров легче остальных полимеризуется 2,5-диметилстирол, образуя полимер с нагревостойкостью порядка 150° С. Величина ϵ для него около 3, зависимость угла потерь от температуры при частоте 1 *Мгц* показана на рис. 59.

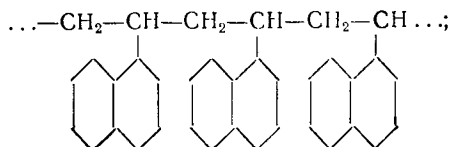
По некоторым зарубежным данным, приведенным в обзоре Н. И. Воробьева, можно установить, что для полимера α -метилстирола:



была получена нагревостойкость порядка 180° С.

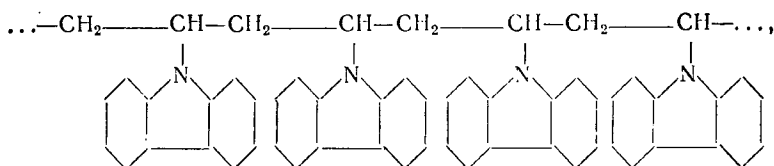
Возможность переработки полимеров метилированных стиролов в тонкие пленки, пригодные для использования в конденсаторостроении, еще нуждается в дополнительной проверке.

Выше было показано, что, используя sdвоенное бензольное кольцо, характерное для производных нафталина, можно получать полимеры с повышенной нагревостойкостью, например полимер α -винилнафталина:



однако подобные полимеры хрупки и для изготовления тонких пленок непригодны. Как отмечалось выше, такие продукты можно использовать в процессе сополимеризации со стиролом для небольшого улучшения нагревостойкости.

в. Поливинилкарбазол. Несколько схожей структурой обладает поливинилкарбазол:



в котором бензольные кольца соединены по два через атом азота.

Мономер этого вещества: винилкарбазол получается при каталитическом присоединении ацетилена к карбазолу; мономер представляет собой твердый воскообразный продукт, обладающий температурой плавления $61-65^\circ \text{C}$.

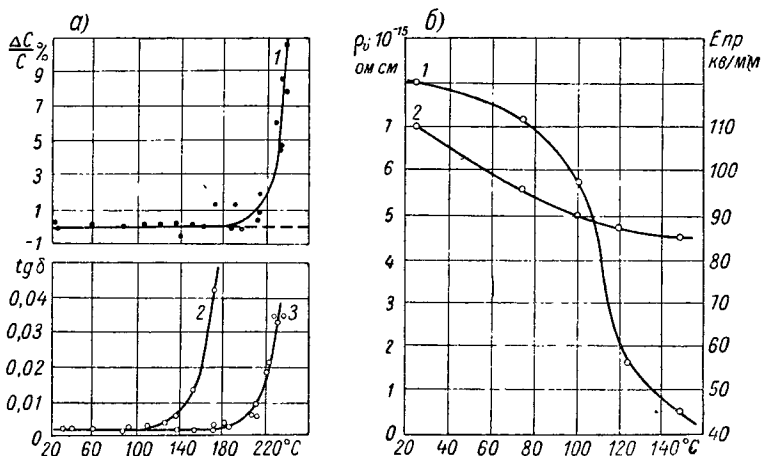


Рис. 60. Электрические характеристики пленки полэлектрон в опытных конденсаторах:

а — зависимость емкости (1) и угла потерь (2, 3) от температуры (2 — недосушенная пленка, 3 — высушенная); б — зависимость удельного объемного сопротивления (1) и пробивной напряженности при частоте 50 гц (2) от температуры.

Полимеризация при нагревании дает нагревостойкий полимер с температурой размягчения, превышающей 150°C . Поливинилкарбазол — слабополярное вещество: $\epsilon = 3,0$; $\text{tg } \delta \approx 5-10 \cdot 10^{-4}$, $\rho_v \approx 10^{16} \text{ ом} \cdot \text{см}$.

В США этот продукт был опробован для получения пленок методом отливки из раствора. Электрические характеристики опытных конденсаторов из пленки такого типа, названной «полэлектрон», при толщине пленки порядка 40 мк, показаны на рис. 60. Временное сопротивление пленки растяжению составляло

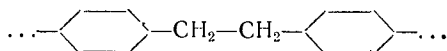
280—420 кГ/см², видимо, при весьма небольшом удлинении, так как американские исследователи подчеркивали хрупкость этой пленки. Механические свойства пленки можно было несколько улучшить введением специальных пластификаторов или нетокоушной пленки после отливки, с целью сохранения в ней остатков растворителя; но при этом ухудшались электрические свойства, в частности, наблюдался рост угла потерь уже при температурах выше 100° С, тогда как для сухой пленки, при частоте 1 кГц, потери сохраняли стабильное значение вплоть до 180° С.

Конденсаторы из пленки полектрон предполагалось применить в качестве заменителей слюдяных конденсаторов, но, видимо, в данном случае приходилось ориентироваться уже не на намотку конденсаторов, а на их сборку из кусочков пленки, как и в случае слюды. В таком виде поливинилкарбазол не нашел себе широкого распространения в конденсаторном производстве. Большее применение в некоторых зарубежных странах, в частности в США и в Италии, этот продукт нашел в виде пропиточной массы для бумажных конденсаторов. Пропитка производится расплавленным мономером, после чего конденсаторы прогреваются для полимеризации пропиточной массы. Рабочая температура для таких конденсаторов обычно указывается равной 125—150° С.

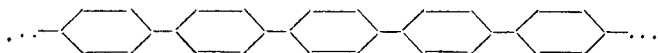
Недостатком рассматриваемого материала является то, что в стадии мономера он является токсичным и может вызвать кожные заболевания; в стадии полимера этот недостаток пропадает.

Еще более существенное повышение нагревостойкости органических полимерных продуктов можно получать, если использовать соединения, у которых бензольные кольца введены не в боковые цепи, а непосредственно в цепь самого полимера.

Так, для полипараксилена:



была получена нагревостойкость около 300° С, а для полифенилена:

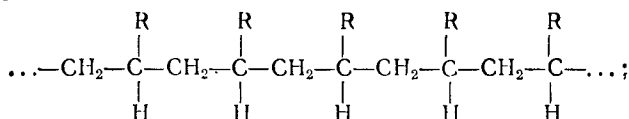


даже около 500° С. К сожалению, твердость и хрупкость этих нагревостойких соединений не позволяет ставить вопрос об их переработке в тонкие пленки.

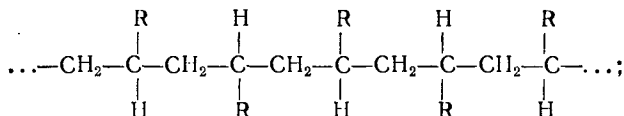
г. Полипропилен. Новым методом получения нагревостойкости полимеров с достаточно высокими механическими свойствами является процесс полимеризации, обеспечивающий повышенную кристалличность продукта за счет образования так называемых изотактических полимеров, о которых мы уже упомянули выше. В этом случае даже для простейших соединений, не содержащих ароматических колец, можно получать относительно высокие значения нагревостойкости.

Изотактическими называют полимеры, у которых достигнута регулярная монотонность в пространственном расположении молекул, обусловленная тем, что при образовании полимерной цепи молекулы создается вполне определенное и правильное расположение составляющих ее звеньев. Это удобнее всего пояснить на примере винильного соединения с боковым радикалом: $\text{CH}_2=\text{CH}\cdot\text{R}$. В процессе полимеризации такого мономера можно получить три основных варианта строения молекулы:

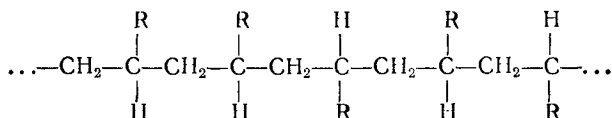
а) изотактический полимер: все радикалы R — расположены на одной стороне от главной цепи:



б) синдиотактический полимер: радикалы расположены по двум сторонам от главной цепи, но строго регулярно чередуются с атомами водорода:



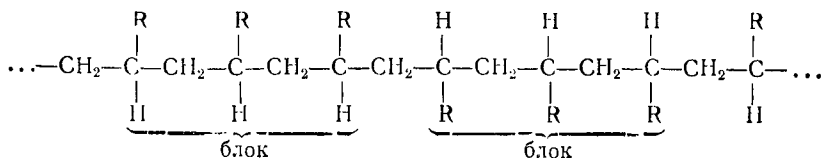
в) атактический полимер: радикалы расположены совершенно нерегулярно по обе стороны от главной цепи:



Приведенные здесь схемы дают лишь условное представление об изотактичности полимерной молекулы, так как расположены в плоскости, тогда как группировки атомов, образующие молекулу, располагаются в трехмерном пространстве; кроме того, основная цепь углеродных атомов будет не прямой линией, как на этих схемах, а может иметь более сложный вид, например, винтовой спирали.

Регулярная структура изотактического полимера оказывается весьма устойчивой, сохраняясь после длительного нагрева в присутствии катализаторов изомеризации (например, галогидных соединений алюминия); термическая деполимеризация таких полимеров идет очень медленно. Вместе с тем быстрое разрушение молекулы может наступить при окислении в присутствии перекисей или при воздействии элементарного хлора.

Для получения полимеров с изотактической структурой требуется применение специальных гетерогенных ионных катализаторов полимеризации; при этом обычно не удается обеспечить 100% содержание изотактического полимера. Наряду с ним получается известное количество атактического продукта, а также может образовываться стереоблочный полимер, представляющий собой регулярно построенные блоки, входящие в одну молекулярную цепь, но с разным направлением боковых радикалов в каждом блоке. В нашем примере схематически это будет выглядеть так:



Изотактические полимерные молекулы образуют собой кристаллическую фазу в готовом продукте; энергия связи между такими молекулами может достигать нескольких килокалорий на моль. Наличие стереоблочной структуры затрудняет кристаллизацию; атактические молекулы образуют собой аморфную фазу полученного полимера.

Свойства готового продукта в значительной степени будут зависеть от количественного соотношения этих трех фаз и от распределения молекулярных весов молекул, входящих в каждую фазу. При значительном содержании изотактической кристаллизованной фазы можно получать продукт с повышенной нагревостойкостью и в то же время с хорошими механическими свойствами.

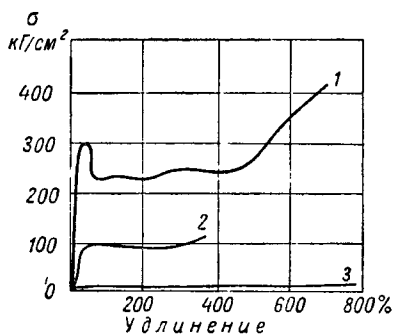


Рис. 61. Диаграммы растяжения для трех образцов полипропилена.

1 — изотактический, кристалличность 75%;
2 — стереоблочный, кристалличность 50%;
3 — атактический, аморфный.

Первым из таких продуктов явился полипропилен, новый неполярный полимер, разработанный впервые в Италии. Исходный мономер: пропилен $\text{CH}_2=\text{CH}\cdot\text{CH}_3$ представляет собой газ и имеет точку кипения $-48,2^\circ\text{C}$ (при давлении 749 торр). Как и этилен, он может быть получен при переработке нефти и природного газа, т. е. представляет собой дешевое и недефицитное сырье для получения полипропилена. Полимеризацию пропилена можно вести методом, близким к методу получения полиэтилена низкого давления, добываясь высокого содержания кристаллической изотактической фазы, обеспечивающей повышение плотности и нагревостойкости получаемого продукта.

Если полипропилен нерегулярной структуры имеет плотность $0,85\text{ г/см}^3$ и температуру размягчения 75°C , то при изотактической структуре соответственно можно получать $0,92\text{ г/см}^3$ и $160\text{—}170^\circ\text{C}$. Диаграмма растяжения для трех образцов полипропилена с различным содержанием кристаллической фазы, по данным Е. С. Корхауза и А. П. Супрун, показана на рис. 61.

При содержании кристаллической фазы 60% для полипропилена указывают следующие средние значения характеристик:

Плотность	$0,90\text{—}0,92\text{ г/см}^3$
Температура размягчения по Вика	150°C
Температура плавления	$165\text{—}170^\circ\text{C}$
Временное сопротивление растяжению	$360\text{—}400\text{ кг/см}^2$
Удлинение при разрыве	$100\text{—}600\%$

Таким образом, материал обладает эластичностью даже при значительном содержании кристаллической фазы и при высокой нагревостойкости, хотя не достигающей тех значений, которые обес-

печивает политетрафторэтилен, но превосходящей то, что можно получать от обычного полистирола или полиэтилена.

По данным Тэрнера, в Англии были проведены успешные опыты по изготовлению из полипропилена тонких пленок методом выдувания, как и в случае получения полиэтиленовых пленок. В связи с лучшими механическими свойствами полипропилена толщину пленки можно снизить в сравнении с полиэтиленом. Тэрнер сообщает, что если нижний предел толщины пленки для полиэтилена составляет 7,5 мк, то для полипропилена его можно снизить до 4 мк. По-видимому, эти данные соответствуют изготовлению опытных пленок в лабораторных, а не в производственных условиях.

Приведенные Тэрнером данные о физических и механических свойствах полипропилена, в основном, совпадают с указанными выше значениями. Для электрических характеристик он приводит следующие значения:

$$\varepsilon = 2,1; \quad \operatorname{tg} \delta \approx 2 \cdot 10^{-4} \text{ и } \rho_v \text{ выше } 10^{16} \text{ ом} \cdot \text{см.}$$

В ФРГ начат выпуск полипропиленовой пленки для применения в конденсаторостроении с толщинами 10, 15 и 20 мк под названием «хостален РРН».

Для нее указываются следующие значения основных характеристик:

Плотность	0,905 г/см ³
Гигроскопичность	0,2%
Температура плавления	160—165°C
Рабочая температура	100°C
Температура хрупкости	—32°C
Временное сопротивление растяжению	400—450 кг/см ²
Диэлектрическая проницаемость (до 1 Мгц)	2,0
Тангенс угла потерь (до 1 Мгц)	5.10 ⁻⁴
Пробивная напряженность	60—80 кВ/мм
Удельное объемное сопротивление	10 ¹⁴ ом·см

Судя по величине плотности, содержание кристаллической фазы в этой пленке, вероятно, не превышает 60%; значения электрической прочности и удельного сопротивления представляются заниженными; возможно, что это связано с недостаточным опытом фирмы по изготовлению данной пленки.

По последним данным производство пленки из полипропилена освоено также и в США, но этот материал стоит пока дороже, чем полистирол или полиэтилен (полимер-полипропилен стоит 0,42 долл/фунт, полипропиленовая пленка — 0,70 долл/фунт). Возможно, что это связано с тем, что масштаб производства этого нового материала еще недостаточно велик.

По данным Т. Л. Бакуменко, Н. П. Федоренко и Е. П. Шукина, в наших условиях полипропилен будет стоить значительно дешевле ряда других пластмасс, как показывает табл. 9.

Таблица 9

Экономическое сравнение некоторых видов пластических масс по отношению к полиэтилену высокого давления

Название пластмассы	Себестоимость, %	Капитальные затраты, %
Полиэтилен высокого давления	100	100
Полиэтилен низкого давления	140	110
Полистирол суспензионный	160	65
Фенопласт	110	55
Полипропилен	75	60

Эти данные показывают, что полипропилен является весьма перспективным новым неполярным диэлектриком и что освоение производства тонких полипропиленовых пленок для их применения в отечественном конденсаторостроении является весьма актуальной задачей.

Можно полагать, что заграничные конденсаторные фирмы уже работают над вопросом разработки полипропиленовых конденсаторов, хотя публикаций о конденсаторах такого типа в зарубежной печати еще не появлялось.

Одновременно с освоением производства пленки из полипропилена надо форсировать работы по изучению других изотактических полимеров, которые могли бы дать какие-либо дополнительные преимущества, в сравнении с полипропиленом, при их использовании в конденсаторостроении.

ГЛАВА ВТОРАЯ

КОНДЕНСАТОРЫ С ДИЭЛЕКТРИКОМ ИЗ ПОЛЯРНЫХ ПЛЕНОК

§ 11. Общая характеристика полярных пленок с точки зрения их использования в конденсаторостроении

Если пленки неполярного типа имеют принципиальное преимущество перед пропитанной конденсаторной бумагой в отношении величины угла потерь, что дает им решающее превосходство, когда требуется конденсатор намотанного типа для работы при повышенных или высоких частотах, то пленки полярного типа, имеющие $\operatorname{tg} \delta$ того же порядка, что и бумага (а иногда и выше), лишены этого преимущества.

С точки зрения стоимости, а также возможности производства в очень больших количествах, полярные синтетические пленки уступают бумаге, сырьевая база которой в наших условиях практически неограниченна, а цена относительно невелика.

Поэтому для того чтобы полярная пленка могла конкурировать с конденсаторной бумагой, она должна обеспечить возможность или существенного повышения рабочей температуры конденсатора, выше того предела, который гарантируется для бумажных конденсаторов, или заметного улучшения удельных характеристик конденсатора: повышения его удельной емкости или удельной запасаемой в нем энергии.

Улучшение удельных характеристик может быть достигнуто как за счет увеличения диэлектрической проницаемости, так и за счет увеличения электрической прочности, что позволяет повысить рабочую напряженность поля в диэлектрике и снизить толщину последнего.

Эти соображения позволяют сформулировать основные требования к качеству полярной синтетической пленки, для того чтобы обеспечить ее конкурентоспособность в соревновании с конденсаторной бумагой:

- 1) высокая нагревостойкость,
- 2) высокая диэлектрическая проницаемость,
- 3) высокая электрическая прочность.

Необходимо отметить, что при использовании в конденсаторах нагревостойкость диэлектрика нельзя оценивать только по температуре размягчения, а следует учитывать возможность работы

диэлектрика при одновременном действии высокой температуры и электрического поля и его старение в этих условиях. Полярные диэлектрики в конденсаторостроении преимущественно предназначаются для цепей постоянного или выпрямленного напряжения, когда процесс старения при воздействии поля носит обычно электрохимический характер; в этих условиях необходимо предъявить к диэлектрику еще одно требование:

4) высокое удельное объемное сопротивление.

Выполнение этого требования обеспечивает снижение проводимости диэлектрика при высоких температурах, а это, в свою очередь, позволяет получить резкое замедление электрохимических процессов. Одновременно повышение удельного сопротивления уменьшает опасность возникновения теплового пробоя конденсатора при его работе в условиях воздействия высокой температуры и сильного постоянного поля.

До последнего времени полярные синтетические пленки, предлагавшиеся для применения в конденсаторостроении, имели относительно небольшую диэлектрическую проницаемость, порядка 3—4, т. е. даже ниже, чем для пропитанной бумаги, особенно при использовании полярных пропиточных масс. Поэтому только повышенная нагревостойкость, высокая электрическая прочность и высокое удельное сопротивление позволили некоторым из таких пленок найти применение, которое до сего времени еще далеко не достигло тех масштабов, в которых современное конденсаторостроение применяет неполярные пленки.

Новым видом использования полярных пленок является их применение в тонкопленочных (лако-пленочных и металло-лаковых) конденсаторах, когда специальная технология позволяет получить толщину синтетической пленки меньшую, чем толщина конденсаторной бумаги, а следовательно, иметь увеличенную удельную емкость при малых напряжениях. Этот вопрос мы рассмотрим ниже, в главе четвертой.

Как известно, бумажные конденсаторы широко применяются в цепях переменного напряжения низкой частоты (50 гц). В этих условиях требования к нагревостойкости диэлектрика ограничены, а большое удельное сопротивление не играет такой роли, как при постоянном напряжении. Старение вызывается преимущественно ионизационными процессами, и рабочие значения напряженности поля приходится брать с большим запасом по отношению к кратковременной электрической прочности. Поэтому и величина последней не играет решающей роли. Вместе с тем на первое место выдвигаются экономические соображения о стоимости материала и его недефицитности.

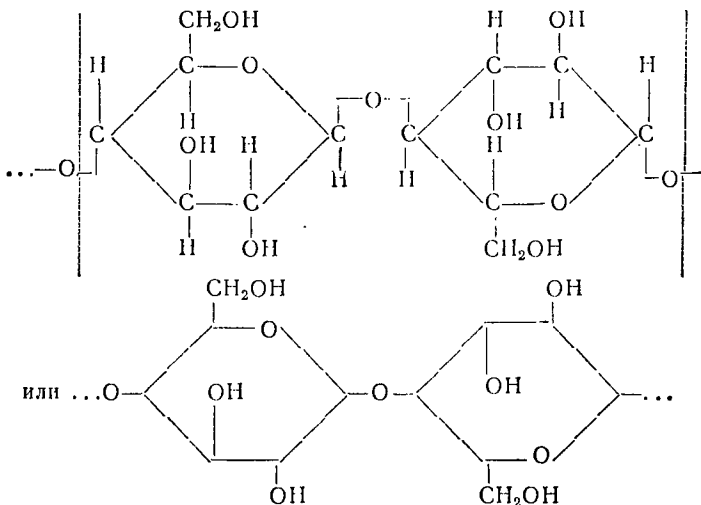
В связи с этим вопрос о замене бумаги полярной синтетической пленкой в производстве силовых конденсаторов переменного напряжения пока еще не приходится ставить в разряд особо актуальных. На ближайшие годы можно ждать, что бумага будет сохранять в этой области монопольное положение как наиболее дешевый и в то же время доброкачественный диэлектрик.

Большее распространение полярные синтетические пленки должны получить в области производства радиоконденсаторов постоянного напряжения, в основном, также не столько в смысле вытеснения бумаги, сколько для дополнения к ней в таких областях, где она уже не удовлетворяет новым требованиям техники, и прежде всего в области высоких рабочих температур, превышающих 100—125°С. Кроме того, полярные пленки могут оправдать себя для таких конденсаторов постоянного напряжения, от которых требуется особенно высокое сопротивление изоляции или пониженный коэффициент абсорбции.

Следует отметить, что теперь появились тенденции к повышению качества бумаги путем ее поверхностной этерификации, специальной химической обработки исходной целлюлозы (этил-цианирование), а также добавлением в состав бумаги, кроме обычной целлюлозы, некоторого количества синтетических органических волокон или стекловолокна; подобными методами можно добиваться повышения нагревостойкости бумаги, снижения ее гигроскопичности и улучшения электрических характеристик. Эти тенденции будут затруднять условия конкуренции полярных синтетических пленок с конденсаторной бумагой и заставят уделять больше внимания их удешевлению и совершенствованию их характеристик.

§ 12. Пленки из эфиров целлюлозы и их применение в конденсаторном производстве

Полярная полимерная молекула целлюлозы характеризуется большим содержанием гидроксильных групп —ОН, которых имеется по три в каждом глюкозном кольце, составляющем звено длинной молекулярной цепи:



Наличие гидроксильных групп позволяет целлюлозе участвовать в реакциях этерификации, при которых меньшая или большая

часть гидроксильных групп заменяется радикалами, представляющими собой остатки молекул кислот или спиртов. Полученные при этом продукты обработки целлюлозы носят название эфиров целлюлозы. В отличие от исходной целлюлозы, ее эфиры обладают плавкостью и легко растворимы в ряде органических растворителей.

Растворимость эфиров целлюлозы позволяет получать из них пленки методом отлива раствора подходящей концентрации на гладкую поверхность с последующей сушкой для удаления растворителя. Минимальная толщина таких пленок составляет 12—15 мк; это определяется тем, что приходится учитывать пониженную прочность пленки, содержащей значительное количество растворителя, до полного завершения ее сушки.

Эфиры целлюлозы были уже известны в начале этого века; поэтому не удивительно, что опыты по использованию пленок этого типа были начаты еще на заре развития конденсаторостроения.

Уже в 1922—1923 гг. за рубежом было налажено промышленное изготовление конденсаторов высокого напряжения с диэлектриком из пленки ацетилцеллюлозы, известной под названием

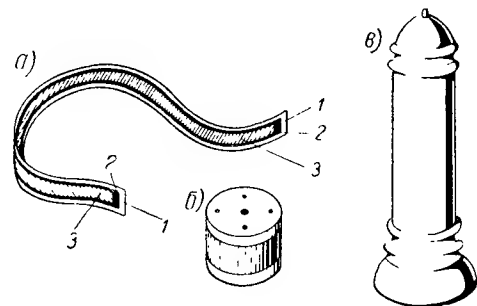


Рис. 62. Целлоновый конденсатор: а — пленка целлона с серебряными электродами и краевой защитой.

1 — целлон; 2 — проводящий лак; 3 — серебро; б — конденсаторная секция; в — готовый конденсатор из нескольких последовательно включенных секций.

«целлон». Ацетилцеллюлоза того времени представляла собой уксуснокислый эфир целлюлозы с относительно небольшой степенью замещения гидроксильных групп, порядка двух групп на звено цепи. Наличие остаточных гидроксильных групп обуславливало значительную гигроскопичность ацетилцеллюлозы и увеличенное значение ее угла потерь, поскольку именно гидроксилы ответственны за гигроскопичность и полярность целлюлозы и получаемых из нее материалов.

Для изготовления целлоновых конденсаторов применялись ленты ацетилцеллюлозной пленки относительно большой толщины, по-видимому, порядка 100 мк.

В качестве обкладок использовали тонкие слои серебра, наносимые на поверхность пленки с обеих сторон методом химического осаждения. Посеребренные ленты высушивали, пропитывали парафином (правильнее сказать, покрывали этим веществом, вероятно, пропуская через ванну с расплавленным парафином) и растягивали на деревянных рамах; после этого к серебряным слоям прикладывали напряжение для «выжигания слабых мест диэлектрика» (правильнее считать, что в этом случае происходило удаление тонкого слоя серебра вокруг точки пробоя, как в современных металлизированных конденсаторах). У краев серебряного слоя на поверхность пленки наносили полупроводящую краску для ослабления краевого эффекта (рис. 62, а). Приготовленные таким путем ленты наматывали на оправку; полученные при этом цилиндрические секции помещали в трубчатый изоляционный корпус, горцы которого закрывали металлическими выводными колпачками (рис. 62, б). Стопки таких секций, соединенных последовательно, помещали в общий фарфоровый корпус, закрытый с торцов металлическими крышками, служившими выводами конденсаторов (рис. 62, в).

Четырехсекционный конденсатор был рассчитан на длительную работу при напряжении 10 кВ и частоте 50 гц. Для больших напряжений применяли последовательное соединение таких конденсаторов, которые монтировали друг на

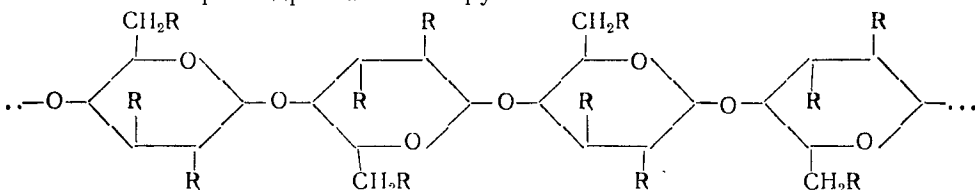
друга в виде вертикальной колонны. Потери в таких конденсаторах были достаточно велики: $\lg \delta \approx 80 \div 130 \cdot 10^{-4}$ при 50 гц.

Приведенные выше данные показывают, что напряжение на каждую элементарную секцию конденсатора составляло $10:4=2,5$ кв; это дает при толщине пленки 0,1 мм напряженность поля 25 кв/мм. Это значение несомненно велико; кроме того, при абсолютном значении напряжения на секции 2,5 кв можно было опасаться появления ионизации в воздушных включениях, которые, вероятно, присутствовали в таком конденсаторе.

Таким образом, можно было ожидать значительного нагрева таких конденсаторов в условиях эксплуатации как за счет чисто диэлектрических потерь, так и за счет потерь на ионизацию. Наличие последней могло также повлечь за собой ускоренное старение диэлектрика конденсатора при длительном действии поля, поскольку известно, что ацетилцеллюлоза не обладает значительной коррозийностью.

По-видимому, практика подтвердила недостаточную надежность конденсаторов данного типа. Их пытались использовать для улучшения коэффициента мощности промышленных установок и в качестве конденсаторов для защиты от перенапряжений, но как в том, так и в другом случае они были вытеснены бумажно-масляными конденсаторами.

Современная химическая промышленность имеет возможность производить этерификацию целлюлозы таким способом, который обеспечивает замещение почти всех гидроксидов в целлюлозной молекуле; в каждом почти звене заменяются кислотными радикалами все три гидроксильные группы:



Уксуснокислый эфир такого типа получил название триацетата целлюлозы. В таком эфире радикалом R является остаток уксусной кислоты CH_3COOH (т. е. $\text{CH}_3\text{COO}-$). Близкими к нему свойствами обладает двойной эфир уксусной и масляной кислот: ацето-бутират целлюлозы. В этом эфире часть радикалов R является остатками масляной (бутириновой) кислоты: $\text{C}_3\text{H}_7\text{COOH}$.

Почти полное замещение гидроксидов позволяет получить продукты с заметно сниженной гигроскопичностью и уменьшенным углом потерь по сравнению с эфирами целлюлозы старых типов.

Для триацетата и ацетобутирата в виде пленок толщиной 25—40 мк, не содержащих пластификатора, можно привести следующие средние характеристики:

Плотность	1,2—1,25 г/см ³
Температура размягчения	170—180°C
Гигроскопичность (при влажности 98%)	2—6%
Временное сопротивление разрыву	900—1200 кг/см ²
Удлинение при разрыве	15—20%
Число двойных перегибов	500—1000
Диэлектрическая проницаемость	3,5—3,7
Тангенс угла потерь при 20°C и 50 гц	50—70·10 ⁻⁴
при 1 кгц	120—150·10 ⁻⁴
при 1 Мгц	200—220·10 ⁻⁴
Объемное удельное сопротивление при 20°C	более 10 ¹⁵ ом·см
Пробивная напряженность при 50 гц	120—160 кв/мм

Эти данные соответствуют качеству пленок, предназначенных для применения в производстве электрических машин и взяты из литературы ФРГ. Триацетатная пленка известна под названием «триафоль». Пределы значений толщины такой пленки: 20—200 мк. Зависимость свойств ацетатной пленки от относительной влажности воздуха показана в табл. 10 по американским и немецким данным.

Таблица 10

Зависимость электрических свойств ацетатной пленки от относительной влажности воздуха при температуре 20°C

Относительная влажность, %	По Гёнигену			По Мистичу					
	ϵ_r 1 кгц	$\operatorname{tg} \delta$, 1 кгц	ρ_v	ϵ		$\cos \varphi$		ρ_v	$E_{пр}$
				1 кгц	1 Мгц	1 кгц	1 Мгц		
0	3,6	1,2—1,5	$4 \cdot 10^{15}$	3,8	3,5	1,5	2,3	10^{15}	150
50	3,8	1,5—1,6	$1 \cdot 10^{15}$	4,8	4,4	1,6	3,1	10^{13}	120
80	4,0	1,8—2,5	$3 \cdot 10^{14}$	—	—	—	—	—	—
98	—	—	—	7,5	7	3,7	3,7	10^{10}	72
Единицы измерения	—	‰	О.М.·СМ	—	—	‰	‰	О.М.·СМ	кВ/мм

Использованный здесь термин «ацетатная пленка» не дает полного уточнения состава пленки: вероятно, это триацетатная или ацето-бутиратная пленка, но во всяком случае это пленка из тройного эфира целлюлозы, т. е. с замещением всех трех (практически) гидроксильных групп в звене молекулы.

Таким образом, хотя гигроскопичность пленки резко снижена в сравнении с бумагой, влияние влажности все же остается достаточно заметным для того, чтобы сделать необходимым сушку и герметизацию конденсаторов.

Мистич отмечает, что несмотря на относительно небольшое количество влаги, удерживаемое пленкой, удаление ее связано с трудностями, особенно когда пленка намотана в виде конденсаторной секции. Остаточная влажность пленки не только ухудшает электрические характеристики конденсатора, но и резко снижает его срок службы, особенно при повышенных температурах. Для того чтобы провести тщательную сушку секций из ацетатной пленки, необходимо применять высокий вакуум и достаточно высокую температуру. Последующая пропитка секций и герметизация конденсатора защищают его от воздействия влаги окружающей среды.

Для пропитки конденсаторов из ацетатной пленки (пленка «пластикон-А») фирма «Конденсатор Продэкстс» (США) применяет минеральное масло или кремний-органическую жидкость; в первом случае по рекламным данным указывается верхний предел рабочей температуры 105°C (тип АО), а во втором случае: 125°C (тип АS).

При нагревании пленки происходит ее усадка: после 48 ч при 65°С усадка составляет (по данным Мистича) 0,05—0,20%, а после 48 ч при 125°С — 0,9—1,5%; такая усадка относительно мало сказывается на величине емкости: после 1000 ч работы конденсатора при напряжении 1,5 $U_{ном}$ и температуре 65°С его емкость изменилась менее чем на 2%.

Пропитка мало изменяет емкость и угол потерь ацетатных конденсаторов, но заметно улучшает электрическую прочность и повышает напряжение начала ионизации.

Емкость ацетатных конденсаторов возрастает с температурой, как показано на рис. 63. Среднее значение ТКЕ по фирменным данным (рис. 63, а) для диапазона температур от —60 до +120°С колеблется в пределах от $+835$ до $+1050 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$; эти данные,

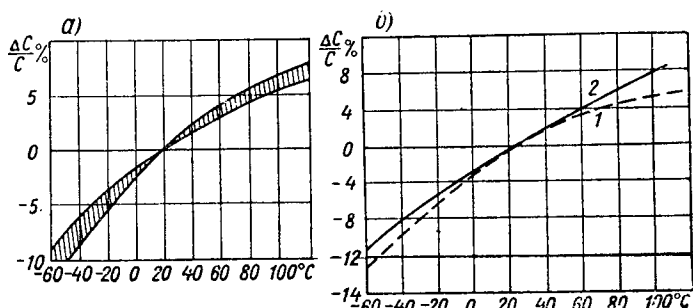


Рис. 63. Зависимость емкости американских ацетатных конденсаторов от температуры: (частота 60 гц):

а — разброс зависимости $C = f(t)$ по данным каталога фирмы «Конденсер Продэктс»; б — влияние пропитки на температурный ход емкости по Мистичу.

1 — сухой непропитанный конденсатор или пропитанный кремний-органической жидкостью; 2 — пропитанный маслом.

видимо, соответствуют конденсаторам, пропитанным кремний-органической жидкостью; Мистич дает кривые (рис. 63, б), по которым значение ТКЕ для сухого непропитанного конденсатора или для пропитанного кремний-органической жидкостью (кривая 1) составляет $+1060 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, а для пропитанного маслом $+1190 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. В другой работе он же указывает для сухого конденсатора значение $\text{ТКЕ} = +1000 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ (пределы температуры: от —60 до +126°С). По данным Гёнингена для конденсаторов из пленки такого типа (из тройного эфира целлюлозы) величина $\text{ТКЕ} = +570 \div +1000 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Для опытного конденсатора из отечественной триацетатной пленки, пропитанного вазелином, для диапазона температур: $-60 \div +80^\circ\text{C}$ было получено значение $\text{ТКЕ} = +1000 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$; вероятно, величина ТКЕ таких конденсаторов может зависеть от натяжения при намотке для цилиндрических секций и от степени сжатия секции для плоскопрессованных. Можно отметить, что по характеру изменения емкости с температурой ацетатные конденсаторы хуже обычных бумажных.

Величина угла потерь у ацетатных конденсаторов также выше, чем у бумажных, как показывает разброс значений этой характеристики, по фирменным данным, на рис. 64, а; при частоте 60 гц коэффициент мощности проходит через максимум при температуре порядка -30°C , составляя 1,7—2%; минимум при этой частоте лежит при температурах $60\text{—}80^{\circ}\text{C}$, составляя 0,6—0,8%; для доброкачественных бумажных конденсаторов можно получать значения коэффициента мощности до 0,2—0,3% и ниже.

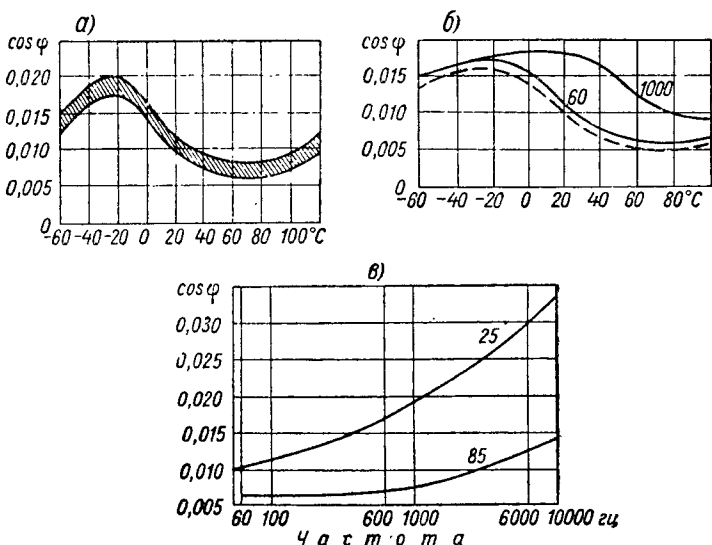


Рис. 64. Коэффициент мощности ацетатных конденсаторов:

а — разброс температурной зависимости при частоте 60 гц по данным каталога; б — влияние частоты на температурную зависимость: цифры у кривых — частота в герцах; сплошные кривые — пропитанный маслом конденсатор, пунктир — непропитанный конденсатор; в — зависимость коэффициента мощности от частоты при двух значениях температуры: 25 и 85°C ; пропитанные конденсаторы.

Влияние повышения частоты на положение температурного коэффициента мощности ($\cos \varphi \approx \text{tg } \delta$ при небольших углах δ), а также влияние частоты на величину потерь при 25 и 85°C , по данным Мистича, показано на рис. 64, б и в.

Постоянная времени ацетатных пропитанных конденсаторов, по данным Мистича, того же порядка, что и у бумажных конденсаторов (рис. 65); для тщательно высушенных, но непропитанных конденсаторов постоянная времени повышена. Характер зависимости постоянной времени от температуры примерно такой же, как и для бумажных конденсаторов: в эмпирической формуле для температурной зависимости постоянной времени:

$$\lg(RC)_t = \lg(RC)_{20} - \beta(t - 20),$$

значение коэффициента β составляет 0,025—0,03. Данные рис. 65 соответствуют измерению с выдержкой 2 мин при напряжении 200 в.

При измерении коэффициента абсорбции для ацетатного конденсатора, пропитанного маслом, при времени заряда 15 мин, времени закорачивания 1 сек и времени от момента размыкания до измерения 1 ч, получены следующие значения: при 20°С — 5,2%; при 50°С — 5,7% и при 75°С — 6,2%. Для непропитанных конденсаторов значение k_a заметно снижено и составляет 2% во всем диапазоне рабочих температур; однако непропитанные конденсаторы могут применяться лишь при напряжениях постоянного тока не свыше 600 в.

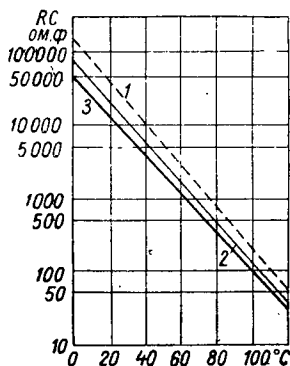


Рис. 65. Зависимость постоянной времени ацетатных конденсаторов от температуры.

1 — непропитанный; 2 — пропитанный кремний-органической жидкостью; 3 — пропитанный маслом.

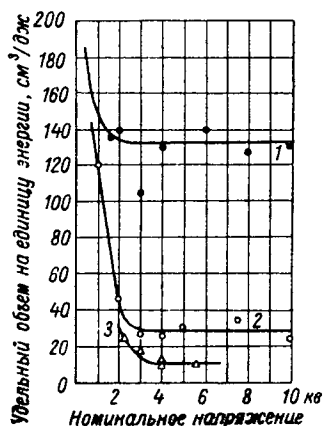


Рис. 66. Зависимость удельного объема, рассчитанного на 1 дж запаса энергии, от номинального рабочего напряжения:

1 — бумажные конденсаторы типа КБГ; 2 — ацетатные для длительной работы при постоянном напряжении; 3 — ацетатные для фотовспышки.

Пропитанные конденсаторы пригодны для работы при высоких напряжениях постоянного тока; их выгодно применять при напряжениях выше 2 кВ, так как при этом резко снижается удельный объем, приходящийся на единицу запасенной энергии (рис. 66); это объясняется тем, что нижний предел толщины пленки относительно велик: 18—20 мк; при снижении напряжения до 2—3 кВ мы доходим до минимального значения толщины диэлектрика $d_{\min}$ и при еще более низких напряжениях должны применять тоже значение $d_{\min}$, т. е. снижать значение $E_{\text{раб}}$. При относительно больших напряжениях допустимое значение напряженности поля для ацетатных конденсаторов выше, чем для бумажных, в 1,5—2 раза; это дает возможность получить выигрыш в удельном объеме в сравнении с бумажными конденсаторами до 4 раз. Мистич указывает, что при температуре 65°С применение напряженности 64 кВ/мм позволяет обеспечить срок службы ацетатных конденсаторов, измеряющийся тысячами часов.

При работе в режиме однократных импульсов (фотовспышка, сварка разрядом, рентгеновская аппаратура) возможно повышение рабочей напряженности поля до 80 кВ/мм.

Данные рис. 66 показывают, что если для конденсаторов КБГ (кривая 1) удельный объем при напряжениях выше 2 кВ составляет 100—130 см³/дж, то для конденсаторов из пленки пластикон-А, рассчитанных на длительную работу при постоянном напряжении (кривая 2), эта величина снижается до 25—35 см³/дж, а для аналогичных конденсаторов, рассчитанных на работу в режиме фотовспышки (кривая 3), до 10—20 см³/дж. Величина удельной запасенной энергии соответственно составляет: 7,7—10 дж/л; 28,5—40 дж/л и 50—100 дж/л.

Однако эти высокие значения запаса энергии ацетатные конденсаторы могут обеспечить только при относительно небольших температурах, до 65°С: при дальнейшем повышении температуры (по указаниям фирмы) допускаемое рабочее напряжение должно существенно снижаться, как показано в табл. 11.

Таблица 11

Зависимость допускаемого рабочего напряжения от температуры для конденсаторов с диэлектриком из пленки пластикон-А

Температура, °С	Рабочее напряжение, в % от номинального	
	Пропитка маслом	Пропитка кремний-органической жидкостью
65	100	100
85	70	70
105	55	55
125	—	40

Проверка опытных конденсаторов из триацетатной пленки при длительном воздействии температуры 100°С и напряженности 60 кВ/мм показала неустойчивость этого диэлектрика в таком режиме работы; наблюдалось постепенное снижение сопротивления изоляции и относительно быстрый выход образцов из строя. При вскрытии пробивных образцов было установлено, что обкладки из алюминиевой фольги покрыты следами коррозии и была обнаружена свободная уксусная кислота.

Таким образом, при повышенных температурах снижение $E_{\text{раб}}$, по сравнению с указанными выше значениями, действительно необходимо. При этом указываемые фирмой в рекламе значения рабочих температур 105 и 125°С (в зависимости от типа пропитки) носят условный характер, так как запасаемая энергия в единице объема будет значительно ниже номинальной. Действительно, при снижении напряжения до 40% номинального, т. е. в 2,5 раза, энергия уменьшается в 2,5², т. е. в 6,25 раз! При этом для длительной работы мы получаем вместо 28,5—40 дж/л только 4,5—6,5 дж/л, т. е. уже не имеем столь резкого отличия от бумажных конденсаторов, как было показано на рис. 66.

Мистич отмечает, что ацетатные конденсаторы могут применяться и в силовых цепях при низкой частоте; увеличенные потери приводят к саморазогреву конденсатора, но при этом мы находимся в области снижения потерь (см. рис. 64), если исходная температура лежала в комнатных пределах, а потому тепловой пробой не опасен. Если же температура окружающей среды заметно повышена в сравнении с комнатной, то при саморазогреве

можно попасть на поднимающуюся ветвь кривой угла потерь, а тогда тепловой пробой неизбежен.

При повышенных напряжениях переменного тока для ацетатных конденсаторов ионизация должна быть опаснее, чем для бумажных; это связано с тем, что обычно ионизация начинается у края фольги и далее распространяется в первом масляном зазоре, прилегающем к фольге. При этом в случае бумажного диэлектрика выделяющиеся газы могут рассасываться через бумагу, удаляясь из этого зазора, что замедляет развитие ионизационного процесса; в случае ацетатной пленки, мало проницаемой для газов, рассасывание газов из зазора у фольги практически не происходит, и процесс ионизационного разрушения будет идти быстрее.

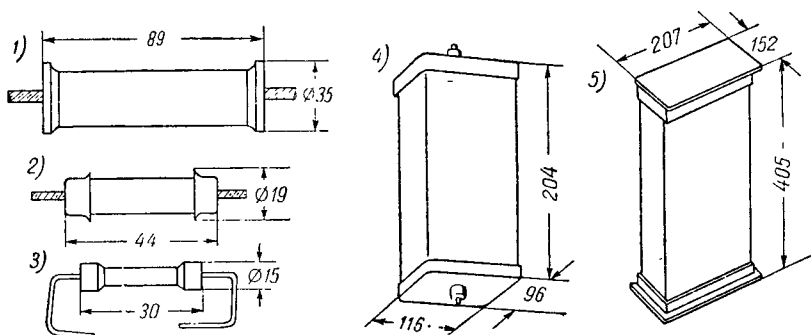


Рис. 67. Ацетатные конденсаторы фирмы «Кондесер Продэкст».

1, 2 и 3 — в герметизированных стеклянных трубках: 1 — 0,0005 мкф, 30 кВ; 2 — 0,02 мкф, 3 кВ; 3 — 0,005 мкф, 1 кВ; 4 — в герметизированном металлическом корпусе: 200 Дж, 4 кВ; 5 — в изоляционном корпусе: 0,04 мкф, 75 кВ.

Поэтому можно думать, что применение ацетатной пленки при переменном напряжении мало целесообразно.

При постоянном напряжении применение ацетатных конденсаторов, видимо, может быть целесообразным при напряжениях достаточно больших для того, чтобы можно было достичь оптимальных значений $E_{\text{раб}}$, и при умеренных температурах нагрева, позволяющих обходиться без снижения допускаемого напряжения. В этом случае можно получить значительное увеличение удельной энергии в сравнении с обычными бумажными конденсаторами. Вместе с тем надо также принимать во внимание цены на исходное сырье: пленка из эфира целлюлозы обычно заметно дороже бумаги, что может сделать ее экономически непривлекательной даже в тех случаях, когда она дает то или иное техническое преимущество.

В США выпускалось большое число вариантов конструкций ацетатных конденсаторов (рис. 67) как в стеклянных трубках при небольших значениях емкости, так и в металлических паяных корпусах; при высоком напряжении и работе в закрытых помещениях изготавливались также конденсаторы в прямоугольных изоляционных корпусах, видимо, с резиновым уплотнением.

Однако, в основном, такие конденсаторы выпускала только одна фирма, Конденсер Продэктс, так как даже в США они не получили значительного распространения. В обзорной работе Гёнингена отмечается, что в ФРГ триафоль применялся для конденсаторов пластинчатого типа вместо слюдяных анодно-блокировочных, когда не требовался малый угол потерь. В настоящее время в западно-европейских странах ацетатная пленка, видимо, не находит себе сколь-нибудь существенного применения. Основной причиной этого являются не только экономические соображения, но также и то обстоятельство, что полярная пленка данного типа не удовлетворяет одному из основных перечисленных выше требований к полярной синтетической пленке для конденсаторостроения: не дает существенного повышения рабочей температуры в сравнении с конденсаторной бумагой.

§ 13. Некоторые типы полярных пленок, опробованные в конденсаторном производстве, но не нашедшие широкого применения

За последние 15—20 лет в конденсаторостроении опробовались различные полярные пленки. Здесь мы остановимся только на тех, которые были доведены до стадии опытного или промышленного использования в конденсаторах, но впоследствии не нашли себе широкого применения на практике.

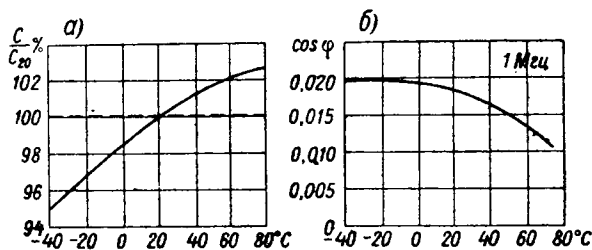


Рис. 68. Зависимость емкости (а) и коэффициента мощности при частоте 1 Мгц (б) от температуры для лектрофильмовых конденсаторов.

а. Лектрофильм. Под этим названием синтетическая пленка использовалась в США фирмой «Дженерал Электрик Ко», причем первое рекламное сообщение о лектрофильмовых конденсаторах появилось в 1943 г. Во время второй мировой войны попытки применить эту пленку, под названием «промайка», проводились также в Англии.

Пленка применялась в двух видах: рулонная (№ 2681) и листовая (№ 2682). Некоторые характеристики пленки лектрофильм приведены в табл. 12, которая показывает, что электрические свойства листовой пленки лучше, чем рулонной. Температурная зависимость емкости и коэффициента мощности (1 Мгц) лектрофильмовых конденсаторов, видимо изготовленных из листовой пленки, показана на рис. 68.

Некоторые характеристики синтетической пленки лектрофильм

Наименование характеристик	Рулонная пленка	Листовая пленка
Плотность, г/см ³	1,11	1,38
Диэлектрическая проницаемость, не менее	4,0	5,5
Температурный коэффициент емкости, град ⁻¹	$+(500 \div 1500) \cdot 10^{-6}$	$+(500 \div 1500) \cdot 10^{-6}$
Коэффициент мощности при частоте 1 Мгц		
при 25° С, не более	$350 \cdot 10^{-4}$	$200 \cdot 10^{-4}$
при 100° С, не более	$175 \cdot 10^{-4}$	$100 \cdot 10^{-4}$
Пробивная напряженность, кв/мм (постоянный ток) (для 2 и более слоев)	76	100
Максимальная рабочая температура, °С	100	125

На рис. 69 показана зависимость от толщины для пробивной напряженности на постоянном токе и для ионизирующей напряженности при частоте 1 Мгц. Минимальная толщина пленки составляла, видимо, 25 мк для рулонной и 37,5 мк для листовой

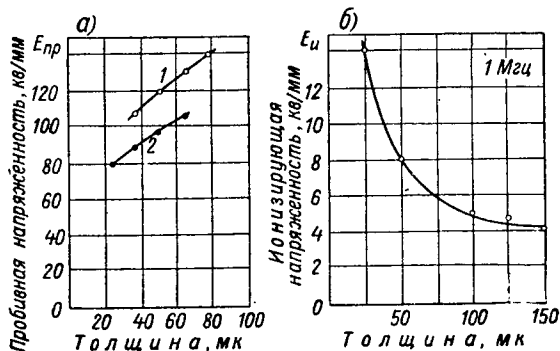
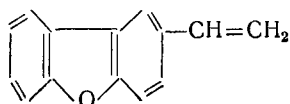


Рис. 69. Зависимость пробивной напряженности при постоянном токе (а) и ионизирующей напряженности при частоте 1 Мгц (б) от толщины для пленки лектрофильм.

1 — листовая пленка; 2 — рулонная пленка.

пленки. В рекламе указывалось, что временное сопротивление разрыву как для рулонной, так и для листовой пленки того же порядка, что и у конденсаторной бумаги, удлинение не оговаривалось.

Состав пленки фирмой не указывался, но по предположению М. М. Котон, данная пленка изготовлялась на основе полимера 2-винил-дibenзофурана:



В данном случае по характеру этой молекулы можно было рассчитывать на повышенную нагревостойкость пленки. Имеются сведения, что для полимера 2-винил-дибензофурана величина диэлектрической проницаемости составляет около 3,5. В этом случае можно думать, что для листовой пленки, имеющей повышенную ϵ , применялось введение какой-либо добавки, усиливающей поляризацию. Возможно, что для этой цели применялась добавка TiO_2 , судя по увеличенной плотности листовой пленки.

Конденсаторы из пленки лектрофильм были предложены в качестве заменителей слюдяных конденсаторов в цепях блокировки и шунтирования, где от конденсатора не требуется малого значения угла потерь и высокой стабильности емкости. Конденсаторы опрессовывались пластмассой или собирались в корпусах из пластмассы (рис. 70, а) со стандартными размерами, характерными

для слюдяных конденсаторов. Чтобы отличить лектрофильмовые конденсаторы от слюдяных, пластмассе была дана зеленая расцветка.

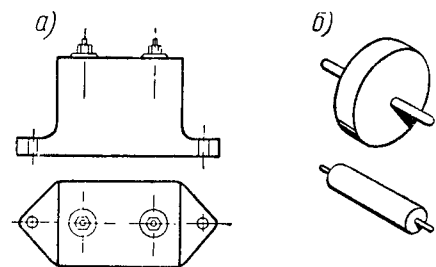


Рис. 70. Внешний вид лектрофильмовых конденсаторов фирмы «Дженерал Электрик Ко»: а — в прямоугольном корпусе из пластмассы; б — в цилиндрических корпусах (для телевизионной аппаратуры).

Номинальные данные для лектрофильмовых конденсаторов в стандартных пластмассовых корпусах № 65 и № 70, по военному стандарту MIL-C. 75.3: корпус № 65, емкость 0,0001—0,001 мкф при 3 кВ, 0,01 мкф при 1 кВ и 0,1 мкф при 0,5 кВ; для корпуса № 70 — те же значения емкостей, но при напряжениях, соответственно увеличенных до 5; 2 и 0,75 кВ.

В 1946 г. было опубликовано сообщение о выпуске нового типа цилиндрических лектрофильмовых конденсаторов для телевизионных устройств (рис. 70, б) с емкостью 500 пф и номинальным напряжением от 5 до 16 кВ; допуск по емкости составлял от 0 до +35%. Допускаемая нагрузка током высокой частоты для этих конденсаторов указывалась равной: 10—30 мА при 20 кГц, 50—100 мА при 100 кГц и 150—300 мА при 300 кГц. Допускаемая реактивная мощность получается при этом очень малой: до 13 вар при частоте 30 кГц для наибольшего габарита.

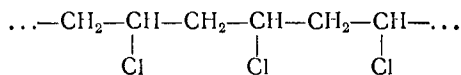
Приведенные в табл. 12 предельные значения рабочей температуры осуществить в реальных производственных конденсаторах не удалось. В более поздних рекламных сообщениях указывалось, что конденсаторы из пленки данного типа рассчитаны на работу в диапазоне температур от -40 до $+75^\circ\text{C}$. Судя по сообщениям 1945 г., фирма предполагала, что лектрофильмовые конденсаторы найдут себе применение в широком диапазоне частот, а именно: при звуковых частотах 12,5—30 кГц, на несущих частотах в аппаратуре дальней проводной связи 30—150 кГц, в установках высокочастотного нагрева 150—550 кГц, в широкоэвещательной аппаратуре 0,55—1,5 МГц и, наконец, при частотах от 25 до 100 МГц (частотная модуляция, телевидение, терапевтические генераторы). Наряду с непропитанными лектрофильмовыми конденсаторами, планировалось также их применение в сочетании с серой и заливкой маслом. По-видимому, во всем указанном диапазоне частот

можно было говорить лишь об использовании этих конденсаторов при малых нагрузках высокочастотным током, вследствие большого угла потерь пленки.

Надежды фирмы на широкое распространение электрофильма в конденсаторостроении не оправдались; эта пленка могла еще находить себе известное применение во время войны, когда слюда стала весьма дефицитным продуктом, так как подвоз ее из Индии сильно осложнился, но вскоре по окончании войны изготовление электрофильмовых конденсаторов, видимо, прекратилось.

б. Полихлорвинил. Исходный мономер для получения полихлорвинила — хлористый винил: $\text{CH}_2=\text{CH}\cdot\text{Cl}$ при обычном давлении — бесцветный газ; температура кипения -14°C , температура плавления $-159,7^\circ\text{C}$; при -13°C удельный вес равен 0,696. В промышленности его получают или присоединением хлористого водорода к ацетилену или отщеплением хлористого водорода от дихлорэтана, получаемого хлорированием этилена.

Хлористый винил легко полимеризируется под влиянием света и различных инициаторов, образуя линейный полимер — полихлорвинил:



Полимер нерастворим в мономере, а потому проводить полимеризацию блочным методом нельзя, а надо использовать водно-эмульсионный метод или полимеризацию в растворителе. Чаще применяют водно-эмульсионный метод.

Полихлорвинил получается в виде белого порошка с плотностью $1,4\text{ г/см}^3$ и температурой стеклования порядка 85°C . При температурах выше 140°C полихлорвинил разлагается с выделением HCl , наличие которого способствует ускорению разложения.

Зависимость ϵ и $\text{tg}\delta$ чистого полихлорвинила от частоты при двух значениях температуры, по данным Хиппеля, показана на рис. 71, а; температурная зависимость, при двух частотах, для полихлорвиниловой пленки «коросил» (США) дана на рис. 71, б.

Для изготовления листового или пленочного полихлорвинила можно пользоваться введением пластификаторов, что понижает температуру размягчения полимера и дает возможность вести его переработку при более низкой температуре. Однако при изготовлении материала для электроизоляционных целей добавка пластификаторов нежелательна, так как приводит к ухудшению электрических свойств и химической стойкости получаемого продукта.

При работе без пластификаторов необходимо вводить стабилизаторы, позволяющие вести переработку при температурах порядка $160-170^\circ\text{C}$; количество вводимого стабилизатора составляет 2—3%. Смешение полимера со стабилизатором проводится в лопастном мешателе или на шаровой мельнице после предварительного просеивания. Далее проводится термическая пластификация на смесительных фрикционных вальцах при указанной выше температуре нагрева. Каландрирование на трехвалковом каландре

позволяет получать пленки однородной толщины, начиная от 0,2 мм и выше.

Таким образом, в принципе, полихлорвинил может представить интерес для конденсаторостроения только как диэлектрик для высоковольтных конденсаторов.

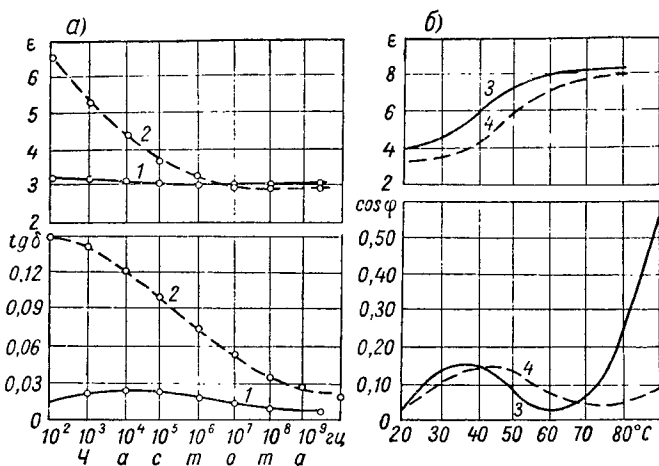


Рис. 71. Частотно-температурная зависимость ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ ($\cos \varphi$) для полихлорвинила:

а — зависимость от частоты для винилита QYNA (чистый полихлорвинил).

1 — при 20° С; 2 — при 96° С;

б — зависимость от температуры для коросила-763 (слегка пластифицированный полихлорвинил); 3 — при частоте 60 Гц; 4 — при частоте 1 КГц.

Э. И. Барг приводит следующие значения характеристик для поливинилхлорида в листовый или пленочной форме (не содержащего пластификаторов):

Плотность	1,38—1,40 г/см ³
Временное сопротивление разрыву	500—700 кг/см ²
Удлинение	10—25%
Теплостойкость по Мартенсу	65—80° С
Коэффициент линейного расширения	60—70·10 ⁻⁶ град ⁻¹
Теплопроводность	3,8—4,10 ⁻⁴ кал/сек·см·град
Удельное объемное сопротивление	10 ¹⁴ —10 ¹⁶ ом·см
Удельное поверхностное сопротивление	10 ¹² —10 ¹⁴ ом
Диэлектрическая проницаемость при 1 Мгц	3,2—3,6
Тангенс угла потерь при 1 Мгц	0,04—0,10
Пробивная напряженность	15—35 кв/мм

В литературе удалось найти лишь одну работу, рассматривающую применение полихлорвинила в конденсаторах (в Югославии). Автор этой работы А. Стройник указывает, что использование полихлорвинила вместо пропитанной бумаги оказывается рентабельным при изготовлении единичных конденсаторов высокого напряжения и небольшой емкости для передачи переменного сигнала, на-

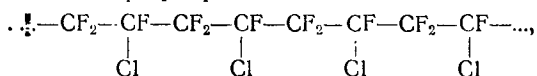
кладываемого на постоянное напряжение. В частности, полихлорвинил был использован для изготовления конденсаторов для электронного микроскопа с номинальными напряжениями 50 и 100 кВ при значениях емкости от 1000 пФ до 0,02 мкФ.

В Югославии выпускается ряд сортов полихлорвинила под общим названием «юговинил», не равнищенных по электрическим свойствам. Поэтому было уделено надлежащее внимание выбору такого сорта, который мог бы обеспечить наилучшие значения характеристик конденсаторов. Выбран был юговинил, изготавливаемый фабрикой в г. Сплит с такими значениями характеристик: плотность 1,38—1,44 г/см³, $\epsilon=3,4$; $\operatorname{tg} \delta=0,020$; $\rho_v=10^{13}$ ом·см и пробивная напряженность при 50 Гц выше 50 кВ/мм (значения ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ соответствуют частоте 1 кГц). Юговинил выпускают с толщиной от 0,3 до 5 мм; выгоднее брать более тонкий материал в несколько слоев. При изготовлении полихлорвиниловых конденсаторов величину закраип приняли равной: 80 мм при 50 кВ и 120 мм при 100 кВ.

Главным препятствием для применения полихлорвинила в конденсаторах являются его недостаточно удовлетворительные электрические свойства, а также небольшая нагревостойкость. Следует отметить, что для непластифицированного полихлорвинила характерна также недостаточная морозостойкость: нижний предел рабочей температуры составляет для него только -20°C . Этими недостатками объясняется применение данного материала в конденсаторостроении лишь в единичных случаях.

в. Политрифтормоноклорэтилен. Исходный мономер для получения политрифтормоноклорэтилена — $\text{CF}_2=\text{CF}\cdot\text{Cl}$ представляет собой при обычной температуре бесцветный газ, конденсирующийся в жидкость при -27°C ; температура плавления: $-147,9^{\circ}\text{C}$. Он может полимеризоваться при комнатной температуре, но для ускорения процесса полимеризацию ведут при $45\text{--}70^{\circ}\text{C}$ в автоклаве, под давлением, в присутствии перекиси бензола.

Полученный полимер имеет правильное линейное строение молекулы, как и политетрафторэтилен:



однако, поскольку симметрия молекулы нарушена введением атомов хлора, политрифтормоноклорэтилен (ПТФМХЭ), в отличие от неполярного ПТФЭ, является полярным материалом и имеет несколько повышенную ϵ и заметно увеличенный угол потерь. Верхний предел рабочей температуры у ПТФМХЭ значительно снижен в сравнении с ПТФЭ: Э. И. Барг указывает, что рабочий диапазон температуры для этого материала составляет от -80 до $+180^{\circ}\text{C}$. Преимуществом его, в сравнении с ПТФЭ, является хорошая текучесть при термической переработке, т. е. лучшая технологичность.

В СССР ПТФМХЭ известен под названием «фторопласт-3», в США — под названием «кель-эф». Этот материал, как и ПТФЭ, обладает кристаллической структурой, но содержит большее количество аморфной фазы. В устойчивом аморфном состоянии ПТФМХЭ (после «закалки», т. е. быстрого охлаждения, препятствующего кристаллизации в процессе остывания) может находиться

при температурах до 50—70° С. В этом состоянии он эластичен, мягок и растяжим. Выдержка при более высоких температурах приводит к кристаллизации, связанной с потерей эластичности.

Э. И. Барг приводит для ПТФМХЭ следующие значения характеристик:

Плотность	2,1—2,15 г/см ³
Временное сопротивление растяжению	400 кг/см ²
Теплопроводность	1,4·10 ⁻⁴ кал/сек·см·град
Удельное объемное сопротивление	10 ¹⁷ ом·см
Диэлектрическая проницаемость	2,5—3
Тангенс угла потерь при 1 Мгц	0,010—0,015
Пробивная напряженность при толщине 0,76 мм	48 кв/мм

Частотная и температурная зависимость ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ для американского продукта кель-эф, по данным Хиппеля, показана на рис. 72; значения этих характеристик согласуются достаточно удовлетворительно с данными Барга.

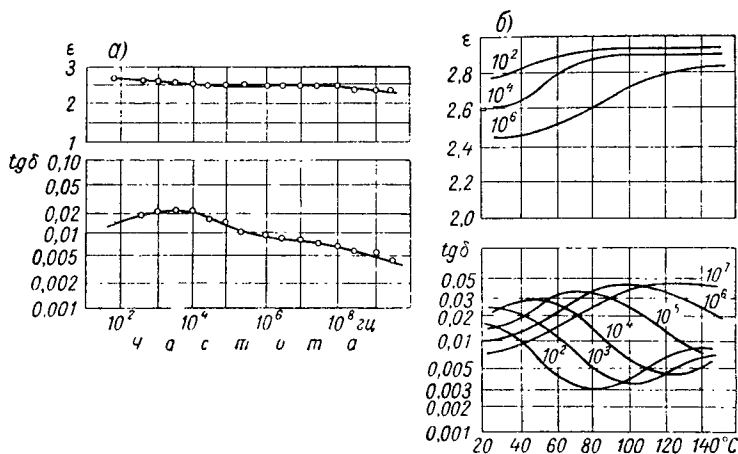


Рис. 72. Частотно-температурные зависимости диэлектрической проницаемости и угла потерь для американского материала кель-эф: а — зависимость ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ от частоты при температуре 25° С; б — зависимость ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ от температуры при разных значениях частоты (цифры у кривых — частота в герцах).

Для получения пленки из ПТФМХЭ, пригодной в конденсаторостроении, может быть использован метод осаждения ее из суспензии на металлическую фольгу с последующим прогревом для спекания частиц полимера в монолитный тонкий слой. После нанесения пленки на тонкую алюминиевую фольгу последняя удаляется путем травления. Этим способом можно получать пленки толщиной до 10—15 мк.

Исследование электрических свойств таких пленок и опыты по их применению для конденсаторостроения проводились Т. Н. Протопоповой. Некоторые

характеристики пленки показаны на рис. 73. На температурной зависимости $\lg \delta$ ясно проявляются два максимума: низкотемпературный, обусловленный движением полярных радикалов (в данном случае — атомов хлора) и высокотемпературный, обусловленный релаксацией звеньев молекулы (рис. 73, а). До 100°C снижение ρ_v с температурой происходит замедленно, далее ускоряется (рис. 73, б); значения температурного коэффициента β в эмпирической формуле $\lg(RC) = f(t)$ соответственно составляют: до перегиба 0,025 и после перегиба 0,075. Таким образом, после перегиба значение β оказывается резко увеличенным в сравнении с обычными значениями для органических диэлектриков ($\beta \approx 0,025 + 0,035$).

Зависимость электрической прочности (при постоянном токе) от температуры характеризуется таким же перегибом, как и зависимость удельного сопротивления (рис. 73, в). Значения $E_{пр}$ здесь значительно выше, чем указано

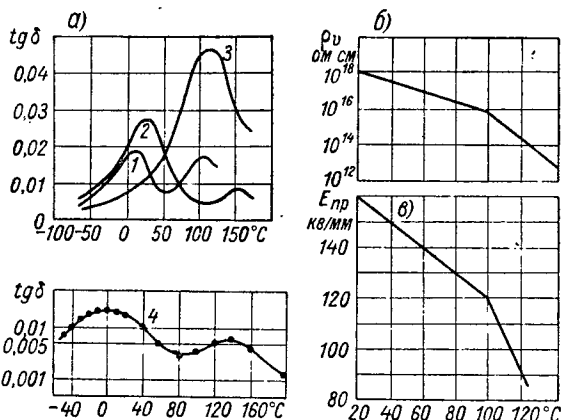


Рис. 73. Некоторые характеристики пленки из фотопласта-3:

а — зависимость $\lg \delta$ от температуры при различных частотах.
 1 — 60 гц; 2 — 1 кГц; 3 — 1 МГц; 4 — 60 гц (материал кель-эф, приводится для сравнения с кривой 1);
 б — зависимость удельного объемного сопротивления от температуры; в — зависимость пробивной напряженности при постоянном токе от температуры.

Э. И. Баргом, в соответствии с различием в толщинах образцов; кроме того, видимо, данные Барга относятся к испытанию при переменном токе.

В отношении стойкости к действию ионизации ПТФМХЭ подобен ПТФЭ, т. е. обладает весьма низкой короностойкостью. Зависимость ϵ от температуры для пленки отечественного изготовления (проверенная при частоте 1 кГц), в отличие от американских данных на рис. 72, оказалась близкой к линейной, с температурным коэффициентом порядка $+1000 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$.

Механические испытания тонких пленок ПТФМХЭ показали, что временное сопротивление разрыву лежит в пределах 350—400 кГ/см^2 , а относительное удлинение сильно зависит от соотношения кристаллической и аморфной фазы. «Закаленная» пленка с большим содержанием аморфной фазы имеет удлинение 200—300%. При медленном охлаждении пленки количество кристаллической фазы возрастает и удлинение падает до значения порядка 20—30%, т. е. примерно в 10 раз. У закаленных пленок снижены значения удельного объемного сопротивления и электрической прочности; $\lg \delta$ у них несколько увеличен.

Можно было думать, что выгоднее наматывать секции из «аморфной» (закаленной) пленки, обладающей повышенной эластичностью, а затем прогревать их для перевода пленки в «кристаллическое» состояние и улучшения постоянной времени и электрической прочности конденсаторов. При этом, казалось бы, можно было рассчитывать на получение конденсаторов с высоким верхним пределом рабочей температуры. Действительно, температура плавления пленки равна $208\text{--}210^\circ\text{C}$; испытания свободно лежащей пленки в термостате показали, что после прогрева 1000 ч при 150°C ухудшения ее электрических свойств не наблюдается. В то же время высокое значение r_g исключает опасность теплового пробоя при постоянном напряжении даже для конденсаторов больших размеров, у которых ухудшены условия отвода тепла из центра к боковой поверхности.

Однако опыты по длительному прогреву секций, намотанных из пленки с большим количеством аморфной фазы, проводившиеся при температурах $125\text{--}150^\circ\text{C}$, показали, что процесс кристаллизации, развивающийся в этих условиях (когда пленка не положена свободно, а намотана с фольгой в тугую спираль), приводит к растрескиванию пленки и резкому падению электрической прочности в местах появления трещин.

Поэтому верхний предел рабочей температуры для намотанных секций нельзя было повышать сверх 100°C . Кроме того, возникло еще одно неудобство при работе с конденсаторами данного типа. Мы уже упоминали пониженную короностойкость пленки ПТФМХЭ, имеющую величину того же порядка, что и у пленки политетрафторэтилена. Эта особенность, при повышенных рабочих напряжениях, даже при постоянном токе, требовала применения пропитки. Однако испытания пропитанных секций показало, что в отличие от других ранее рассмотренных случаев (см., например, рис. 39, б или рис. 46, в) ионизирующее напряжение пропитанных секций практически не изменялось по сравнению с исходным значением до пропитки. Размотка пропитанных секций показала, что благодаря несмачиваемости пленки обычными пропитывающими жидкостями последние не заполняют зазоры между слоями пленки. Можно было обнаружить пропитывающую жидкость только в зазоре между фольгой и пленкой (благодаря смачиваемости металла) и на краях секций; основная же часть зазоров между слоями пленки оставалась сухой. В то же время относительно большая толщина пленки (не тоньше $10\text{--}15\text{ мк}$) делает ее пригодной прежде всего для конденсаторов с повышенным напряжением, требующих пропитки.

Выход из положения был найден применением бумажных прокладок между слоями пленки, играющих роль «фитилей» для всасывания пропиточной массы.

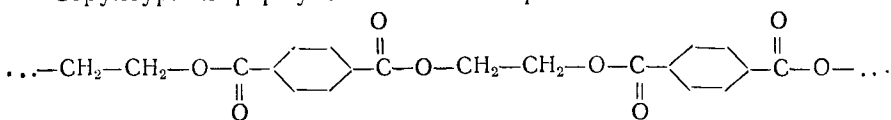
Однако при этом мы имеем уже не чисто пленочный конденсатор, а конденсаторы с комбинированным диэлектриком, которые будут рассмотрены в главе третьей. Пока же можем отметить, что и в таком виде пленка политрифтормонохлорэтилена не нашла про-

мышленного применения в конденсаторном производстве, так как появились лучшие по свойствам и более перспективные материалы — полиэтилентерефталат и поликарбонат.

§ 14. Пленка из полиэтилентерефталата — новый конденсаторный диэлектрик

Полиэтилентерефталат — ПЭТФ относится к классу полиэфиров и представляет собой линейный полимер, получаемый при поликонденсации этиленгликоля: $\text{HOCH}_2\text{—CH}_2\text{OH}$ и терефталевой кислоты: $\text{HOOC—C}_6\text{H}_4\text{—COOH}$.

Структурная формула этого полимера имеет вид:



Симметричная структура терефталевой кислоты обеспечивает отсутствие в молекуле полимера боковых ответвлений. Большое содержание дипольных групп —C(=O)—O— объясняет кристалличность

полимера; содержание кристаллической фазы доходит до 65—75%. Температура плавления полимера составляет 220—260°С; температура стеклования порядка 60—80°С. Молекулярный вес лежит в пределах 12 000—20 000.

В СССР этот продукт известен под названием «лавсан», в США обычно пользуются названием «майлар», относя его преимущественно к материалу в пленочной форме. В ФРГ пленка из полиэтилентерефталата называется «хостафан», в Италии — «монтивель»; в Англии, где впервые был изучен этот продукт, пользуются терминами: «мелинекс» и «терилен»; второй из них преимущественно применяют для обозначения не пленок, а синтетического волокна.

Вытянутые на холоду пленки и нити, по данным Э. И. Барга дают рентгенограмму ориентированных кристаллов. При вытяжке 400—500% временное сопротивление разрыву увеличивается до 10 раз и может достигать значений порядка 3500—4000 кГ/см². Обычно пленки имеют прочность несколько ниже, порядка 2000—3000 кГ/см², но и такое значение много больше, чем у тех типов синтетических пленок, которые мы рассматривали выше, а также больше, чем у конденсаторной бумаги (обычно 900—1200 кГ/см²).

Это обстоятельство позволяет получать из ПЭТФ пленки с малой толщиной порядка 6 мк, а в перспективе, возможно, и еще более тонкие.

По данным Тэрнера, для таких материалов, как ПЭТФ, которые при расплавлении переходят быстро в состояние низковязкой жидкости, получение пленок удобно вести путем выдавливания расплавленного продукта через щель на поверхность тщательно полированного охлаждаемого металлического барабана, с которого далее снимается остывшая пленка. При этом получается за-

готовка, толщина которой в 10 раз выше, чем требуется от готовой пленки. Для уменьшения толщины и получения ориентации молекул для повышения прочности проводится вторая операция — растяжка пленки при температуре ниже температуры выдавливания, но выше температуры стеклования. Растяжку ведут в двух направлениях, чтобы избежать склонности односторонне вытянутой пленки к продольному растрескиванию.

По данным Вули, Комана и Мак Магона, опубликовавших одну из первых работ по применению пленки ПЭТФ для конденсаторов, ее плотность равна $1,4 \text{ г/см}^3$, пленка бесцветна, прозрачна; имеет высокую прочность на разрыв и большое сопротивление раздиранию; характерна высокой влагостойкостью и устойчивостью против гидролиза. Электрическая прочность выше, чем у конденсаторной бумаги, и при толщине пленки 30 мк составляет 240 кВ/мм; при испытании такой пленки на содержание проводящих частиц обычным методом, применяемым при испытании конденсаторной бумаги, таких частиц обнаружено не было. Значения ϵ и $\text{tg} \delta$ при температуре 25°C и трех частотах приведены в табл. 13. Удельное объемное сопротивление при комнатной температуре и напряжении 400 в составляет $3 \cdot 10^{15} \text{ ом} \cdot \text{см}$.

Таблица 13

Электрические свойства пленки
майлар при 25°C

Частота, кГц	Диэлектрическая проницаемость	Тангенс угла потерь
1	3,4	0,0055
10	3,4	0,0180
100	3,3	0,0160

Электрические свойства пленки могут быть заметно улучшены прогревом; термообработка при 200°C в течение 2 ч уже дает существенное улучшение характеристик. Короностойкость пленки недостаточно велика, хотя и лучше, чем у фторсодержащих полимеров; поэтому непропитанные конденсаторы из пленки ПЭТФ рекомендуется применять при напряжениях ниже 300 в переменного тока. При больших значениях напряжения нужна пропитка.

Частотно-температурные зависимости диэлектрической проницаемости и коэффициента мощности для полиэтилентерефталатной пленки приведены на рис. 74. Сравниваются данные для пленки майлар, приведенные Хиппелем, и для пленки мелинекс, взятые из книги Дэммера. Кроме того, показаны пунктиром кривые $\cos \varphi = f(f)$, по данным обзорной работы Козенса, которые, видимо, также относятся к пленке мелинекс. Некоторый разброс данных может быть вызван различиями в методике измерения, но, до известной степени, может быть также обусловлен и различием в качестве образцов, в частности, неодинаковым соотношением аморфной и кристаллической фазы.

При комнатной температуре заметное снижение ϵ пленки с ростом частоты наблюдается лишь при частотах выше 0,1 Мгц; частотный максимум потерь соответствует частоте порядка 1 Мгц. В области положительных температур ϵ мало зависит от температуры до 80—85°С при низких частотах; при радиочастотах и в этой области температур наблюдается заметное изменение ϵ . При частотах 50 и 1000 гц при температуре 125°С можно увидеть резко выраженный температурный максимум угла потерь; это высокотемпературный максимум, который заметно зависит от содержания аморфной фазы и увеличивается для «закаленных» пленок.

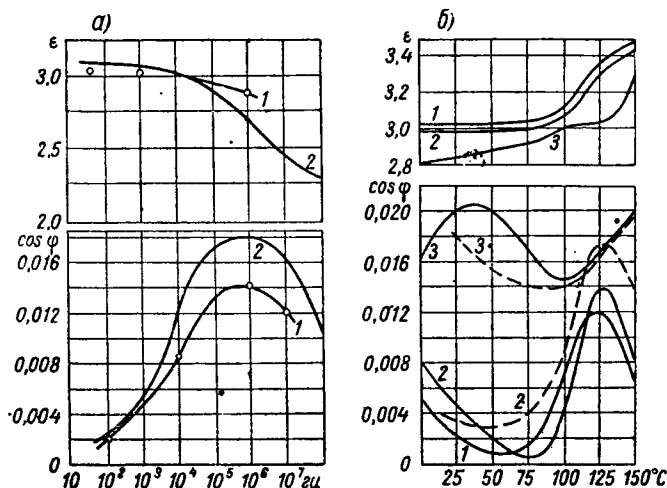


Рис. 74. Частотно-температурные зависимости диэлектрической проницаемости и коэффициента мощности полиэтилентерефталатной пленки:

а — зависимость ϵ и $\cos \varphi$ от частоты при температуре 20°С. 1 — меллинекс (по Дэммеру); 2 — майлар (по Хиппелю);

б — зависимость ϵ и $\cos \varphi$ от температуры для пленки меллинекс по данным Дэммера.

1 — 50 гц; 2 — 1 кгц; 3 — 1 Мгц; пунктирные кривые — по данным Козенса.

Низкотемпературный максимум при таких значениях частоты проявляется в области температур ниже нуля и на рис. 74, б не виден; при частоте 1 Мгц этот максимум смещается к температуре порядка 35—40°С и может быть обнаружен на сплошной кривой 3. На пунктирной кривой этот максимум сдвинут в сторону более низких температур.

Указанное выше значение ρ_v , по-видимому, занижено; возможно, что оно относится к образцу с очень большим содержанием аморфной фазы. По данным Хиппеля, даже при 130°С величина ρ_v превышает 10^{14} ом·см, а при 200°С еще составляет около 10^{11} ом·см. Доброкачественная пленка имеет удельное сопротивление выше, чем пропитанная бумага, так как постоянная времени конденсаторов из пленки ПЭТФ обычно выше, чем у бумажных

конденсаторов. Мистич приводит для пленки майлар значение 10^{19} ом·см при комнатной температуре.

Значения электрической прочности также могут быть выше, чем указано в работе Вули, Комана и Мак Магона. Так, для особо тонких пленок с серебрёнными электродами диаметром 25 мм, при комнатной температуре, Руби получил следующие значения пробивной напряженности: 460 кВ/мм при 5,5 мк, 380—400 кВ/мм при 6,25 мк и 340 кВ/мм при 7,5 мк. Поскольку указанная выше цифра 240 кВ/мм соответствовала толщине 30 мк, можно думать, что здесь сказалось влияние краевого эффекта, вызывающего снижение $E_{пр}$ с толщиной, при испытании в неоднородном поле.

В США пленка майлар изготавливается нескольких марок для различного применения. Для конденсаторостроения предназначается пленка майлар-С. Для полиэтилентерефталатной пленки хостафан, изготавливаемой в ФРГ, приводятся следующие данные:

Размеры пленки:

толщина	20—50 мк
ширина	700—800 мм
длина в рулоне при толщине 20 мк	11 000 м
Плотность	1,4 г/см ³
Температура плавления	260° С
Усадка после прогрева при 100° С . . .	0,5%
Усадка после прогрева при 150° С:	
а) в продольном направлении	3,0%
б) в поперечном направлении	2,0%
Интервал длительной рабочей температуры	—60 ÷ +130° С
Допускаемая кратковременная температура	150° С и выше
Гигроскопичность, по DIN 53472	максимум 0,3—0,4%
Временное сопротивление разрыву, по DIN 5337:	
а) в продольном направлении	1600—2000 кг/см ²
б) в поперечном направлении	1300—1800 кг/см ²
Удлинение при разрыве	60—150%
Число двойных перегибов	100 000
Пробивная напряженность по VDE 0303:	
при 20° С, 50 гц и толщине 40 мк	160 кВ/мм
Диэлектрическая проницаемость при частоте 800 гц	3,2
Тангенс угла потерь при частоте 800 гц	40·10 ⁻⁴
Удельное объемное сопротивление	порядка 10 ¹⁷ ом·см
Коэффициент абсорбции	0,2%

Эти данные достаточно близко сходятся с данными для американской пленки майлар-С. Близкие данные указывает и Тэрнер для английской пленки мелинекс: плотность — 1,38 г/см³, временное сопротивление разрыву — 1400 кг/см², удлинение — 75%, гигроскопичность — 0,5%, $\epsilon = 3,2$ (50 гц), $\operatorname{tg} \delta = 30 \cdot 10^{-4}$ (50 гц), $\rho_v \approx 10^{13}$ ом·см, $E_{пр} = 360$ кВ/мм при толщине 12 мк. Среди этих данных только величина удельного сопротивления, по-видимому, ошибочно занижена.

По последним данным, в США в полупромышленном масштабе начат выпуск нового полиэфира, сходного с полиэтилентерефталата-

том, но обладающего рядом преимуществ, в частности, при использовании в конденсаторостроении. Этот полиэфир представляет собой поли(1,4-циклогексипендиметилтерефталат); отличительной его особенностью является малая зависимость диэлектрической проницаемости от температуры и частоты (табл. 14).

Таблица 14

Зависимость диэлектрической проницаемости и угла потерь пленки терафилм от температуры и частоты

Температура, °C	20	40	60	80	100	120	130	140
ϵ $\operatorname{tg} \delta$	3,1 0,005	3,1 0,003	3,1 0,002	3,1 0,002	3,1 0,0035	3,1 0,012	3,15 0,016	3,22 0,015

Частота, кГц	0,1	1,0	10	100	1000	10 000
ϵ $\operatorname{tg} \delta$	3,15 0,003	3,12 0,0065	3,10 0,011	3,02 0,0125	2,92 0,012	2,90 0,0125

Пленка, изготовленная из этого материала, получила название «терафилм». Емкость конденсаторов, изготовленных из такой пленки, марки Т16, практически не изменяется при повышении температуры до 110° С, а при 150° С увеличивается лишь на 5 %. При этих температурах сроки службы конденсаторов выше, чем у конденсаторов из пленки майлар. Пленка гидролитически стабильна.

Можно ожидать, что пленка терафилм также найдет себе применение в конденсаторостроении, если окажется экономически приемлемой.

§ 15. Полиэтилентерефталатные конденсаторы

При намотке конденсаторов из пленки ПЭТФ, как и в случае неполярных пленок с большим удельным сопротивлением, также приходится сталкиваться с явлением поверхностной электризации. Связанная с ним возможность захвата частиц пыли здесь особенно опасна, так как пленка ПЭТФ иногда применяется для изготовления однослойных фольговых конденсаторов.

Для конденсаторной бумаги и рассмотренных выше синтетических пленок однослойная намотка возможна лишь при использовании металлизации, когда испарение металла вокруг места пробоя обеспечивает самовосстановление электрической прочности; в случае пленки ПЭТФ, в связи с ее высокой электрической прочностью и практическим отсутствием слабых мест (отсутствием проводящих частиц), применение одного слоя возможно и при электродах из фольги.

По предложению Фарнсуорта.¹ для ослабления опасности захвата пленкой в процессе намотки частиц пыли следует применять намоточный станок закрытого типа, помещенный в камеру, передняя стенка которой образована рядом плотно прижатых друг к другу валиков из полистирола с горизонтально расположенными осями (рис. 75); оправка станка располагается вне камеры, возможно ближе к стенке из валиков. Ленты пленки и металлической фольги пропускают в зазоры между валиками и подводят к намоточной оправке. При работе станка полистирольные валики образуют экран, не пропускающий пыль, идущую к пленке внутри камеры; частицы пыли, захваченные пленкой ранее, снимаются при ее проходе между валиками, наконец, наэлектризовываясь от трения, валики захватывают на себя те частицы пыли, которые могли бы попасть на пленку на ее пути вне камеры от валиков до оправки.

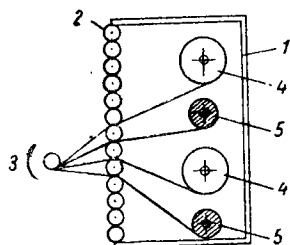


Рис. 75. Схема устройства намоточного станка по патенту Фарнсуорта.

1 — стенки камеры; 2 — передняя стенка из полистирольных валиков; 3 — намоточная оправка; 4 — рулоны пленки; 5 — рулоны фольги.

Хотя гигроскопичность пленки ПЭТФ невелика (по Мистичу майлар поглощает менее 0,3% воды при лежании в псй в течение недели при 25°С), но все же для улучшения электрических свойств конденсаторов предусматривается их вакуумная сушка, после которой следует операция запекания при повышенной температуре. При запекании происходит усадка пленки, способствующая вытеснению воздуха из зазоров между витками и стабилизации емкости конденсатора; спекание пленки на торцах секции повышает влагостойкость; наконец, как отмечалось выше, в процессе запекания происходит кристаллизация аморфных областей материала, связанная с улучшением его электрических характеристик. При этом высокая механическая прочность пленки позволяет запекать намотанные секции, не опасаясь механических повреждений, как в случае пленки из фторопласта-3, при условии, что режим запекания выбран правильно.

Влияние температуры запекания на электрические свойства конденсаторов из пленки майлар, по данным Вули, Комана и Мак Магона, показано на рис. 76. Для того чтобы сохранить высокую электрическую прочность, надо вести запекание при температурах не выше 210°С. Одновременно со снижением угла потерь и уменьшением ТКЕ конденсаторов, в процессе запекания улучшается также постоянная времени.

В патентной литературе можно найти ряд данных о режимах технологии производства конденсаторов из пленки ПЭТФ. Применительно к пленке мелинекс рекомендуется² вакуумная сушка при температуре ниже температуры релаксации (равной 150°С), например, при 50°С, а запекание — при температуре выше точки релаксации, например, при 180—200°С; нагрев секций во время сушки под вакуумом (или в неокисляющей атмосфере) следует вести медленно: время сушки — порядка 17 ч; время запекания — 1,5 ч. Эта технология обеспечивает повышение постоянной времени в 10 раз.

¹ Англ. патент, кл. 37.83/2. № 809381, 25.02.159, Дж. Фарнсуорт.

² Англ. патент, кл. 37, № 811984, 15.04.1959, К. Вильямс.

Применение вакуумной сушки с последующим запеканием (при 207°C , 2 ч) рекомендуется и в другом английском патенте;¹ такая же температура запекания, но при выдержке 0,5 ч рекомендуется в патенте США.²

В этом патенте описан также способ контактирования секций. Предложено брать ширину фольги b_1 несколько меньше ширины пленки b_2 , например, на 6 мм, и вести намотку так, чтобы край одной ленты фольги приходился вровень с одним торцом секции, а край второй — с другим торцом (рис. 77, а). Отношение толщины фольги к толщине пленки должно составлять $d_1/d_2=0,2\div 1,0$; например, при диэлектрике $2\times 6,25$ мк — обкладка 4,3 мк (алюминиевая фольга). После запекания к торцу секции прижимается проволоочный вывод, нагретый до 250°C , т. е. выше точки плавления пленки, причем вывод разрешается погрузить в глубь секции не более чем на 3 мм (рис. 77, б). Далее, чтобы повысить влагостойкость секции, ее торец оплавляется паяльником, нагретым также до 250°C . На торце образуется смесь частиц металла и дезориентированного полимера с удельным сопротивлением не более $2\text{ ом}\cdot\text{см}$; она создает контактный слой, обеспечивающий надежное электрическое соединение вывода с обкладкой. Такую же операцию продлевают и с другим торцом. Данный метод контактирования пригоден и для металлизированных конденсаторов при условии, что слой металлизации имеет повышенную толщину. Оформленный таким методом конденсатор может быть опрессован пластмассой, если температура опрессовки будет не выше 210°C .

Для того чтобы обеспечить нагрев торца намотанных секций (с целью его оплавления для повышения влагостойкости) без излишнего перегрева секции в целом, французский патент³ предлагает использовать нагрев инфракрасными лучами,

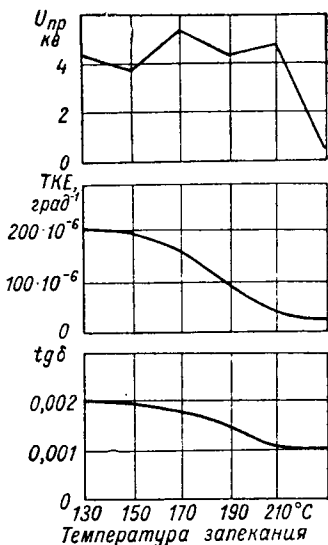


Рис. 76. Влияние температуры запекания на пробивное напряжение (постоянный ток), температурный коэффициент емкости и тангенс угла потерь майларовых конденсаторов. Угол потерь измерен при 65°C и 1 кГц.

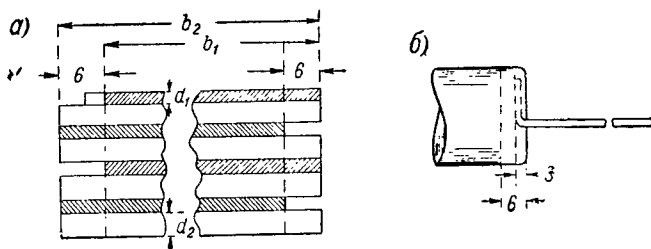


Рис. 77. Схема устройства вывода у секции полиэтилен-терефталатного конденсатора по патенту Невервуда.

которые концентрируются на торце секции с помощью специального оптического приспособления.

¹ Англ. патент, кл. 37, № 811982, 15.04.1959, Ф. Ч. Робинзон, Ф. Р. Бекетт.

² Патент США, № 2785352, 12.03.1957, Н. Невервуд.

³ Франц. патент, кл. 1101g, № 1213810, 4.04.1960, М. Лафарг.

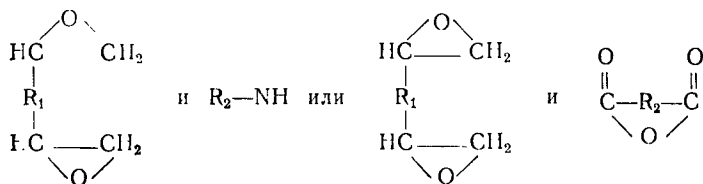
Предприятие «Тесла» (ЧССР) при изготовлении небольших конденсаторов из пленки хостафан проводит запекание секций при температуре $230 \pm 5^\circ \text{C}$ с последующей быстрой обдувкой торцов струей горячего воздуха, нагретого до 300°C , для их оплавления.

Согласно английскому патенту,¹ для получения надежного контакта вывода с обкладкой предлагается использовать намотку с выступающей фольгой, применяя перед намоткой непосредственную припайку к фольге переходного вывода в виде медной или оловянной фольги. После намотки на торцы секции напыляется легкоплавкий металл, соединяющий весь край выступающей фольги с переходным выводом. Далее к этому выводу припаявается проволока, служащая основным выводом.

При использовании металлизированной пленки контактирование также производится напылением металла на торцы, как и в производстве металло-бумажных конденсаторов.

При рабочем напряжении порядка нескольких сотен вольт (для переменного напряжения не выше 300 в) можно применять полиэтилентерефталатные конденсаторы без их пропитки. При повышенных напряжениях, даже при постоянном токе, требуется производить пропитку (точнее заливку зазоров в конденсаторе между слоями пленки и между пленкой и фольгой), чтобы повысить ионизирующее напряжение и устранить опасность короны, к которой пленка достаточно чувствительна. В США в качестве пропиточной массы обычно применяют кремний-органическую жидкость, позволяющую обеспечить повышенное значение рабочей температуры.

Имеются попытки опробования и других типов пропиточных масс. Так, по патенту ФРГ² предлагается вести пропитку смесью мономеров, представляющей собой жидкость с малым давлением паров; при нагреве эта жидкость должна быть способна к отверждению без образования летучих веществ и гидроксильных групп, способствующих гидрофильности получаемого продукта. Входящие в смесь мономеры должны быть способны к реакции не только друг с другом, но отчасти и с пленкой, чтобы обеспечить ее плотное склеивание с пропиточной массой. При использовании обкладок из фольги пропиточная масса должна иметь также достаточную адгезию к металлу фольги. В этом случае устраняется возможность образования воздушных включений в диэлектрике пропитанного конденсатора и обеспечивается его высокая электрическая прочность. Конденсаторы с таким видом отвердевающей пропитки, по мнению авторов патента, пригодны для работы в интервале температур от 150°C до -40 и даже до -70°C . Рекомендуются следующий состав пропиточной смеси:



Режим пропитки: при 20°C и $0,5 \text{ торр}$ — 4 ч и далее при атмосферном давлении 1 ч; запекание 45 мин при 150°C . Влияние пропитки на электрическую проч-

¹ Англ. патент, кл. 37, 83(2), № 811332, 2.04.1959, К. Карлтон, Р. Кларк.

² Патент ФРГ, кл. 21g, 10/02, (H01g), № 1043511, 30.04.1959, Э. Мейер, Г. Шарф, Г. Шписс.

ность (пост. ток) для однослойных конденсаторов из пленки 10 мк (обкладки — алюминиевая фольга) показано на рис. 78. При испытании переменным напряжением 400 в, 50 гц, при 20° С за 3,5 ч пробилось 5 непропитанных конденсаторов, а из пропитанных не пробилось ни один за 36 ч; далее пропитанные конденсаторы выдержали, не пробиваясь, при 100° С, напряжение 350 в (50 гц) 18 дней, напряжение 400 в — 2 дня и, наконец, 500 в — 3 дня. Видимо, испытывались конденсаторы малой емкости.

В настоящее время в тех случаях, когда требуется пропитка конденсатора из пленки ПЭТФ (т. е. требуется повышенное рабочее напряжение), обычно применяют конденсатор с комбинированным диэлектриком, как было предложено для случая использования пленки из фторопласта-3. Такие конденсаторы рассматриваются в главе третьей. Чисто полиэтилентерефталатные конденсаторы без бумажной прокладки, которые мы рассматриваем здесь, представляют собой конденсаторы низкого напряжения, до нескольких сотен вольт.

Конденсаторы этого типа выпускают обычно цилиндрическими, следующих видов конструктивного оформления:

а) открытый тип: влагозащита торцов путем их оплавления. По внешнему виду соответствует полистирольным конденсаторам открытого типа (см. рис. 26); такие конденсаторы изготовляет, например, предприятие «Тесла» (ЧССР);

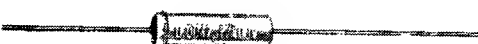


Рис. 79. Итальянские полиэтилентерефталатные конденсаторы, опрессованные термопластичной пластмассой.

Очевидно, только последний тип пригоден для длительной работы при высокой влажности воздуха, порядка 95—98%; первые два варианта конструкции могут надежно работать при влажности до 80%; большинство фирм, выпускающих такие конденсаторы, не указывают в своих рекламах допустимое значение влажности воздуха. При больших значениях емкости герметизированные конден-

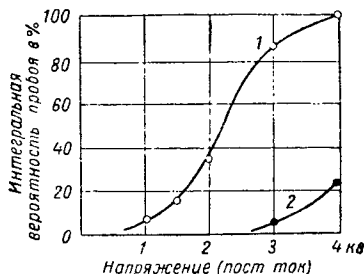


Рис. 78. Влияние пропитки на разброс электрической прочности однослойных конденсаторов из пленки хостафан толщиной 10 мк с обкладками из фольги.

1 — непропитанные; 2 — пропитанные.

б) опрессованный тип (рис. 79); такие конденсаторы итальянская фирма «Лукати» выпускает с опрессовкой полипропиленом;

в) герметизированный тип; в стеклянных трубках, с припаянными к торцам металлическими колпачками (как на рис. 67, з), в металлических трубках со стеклянными торцевыми изоляторами и т. п.

саторы изготовляют также в прямоугольных металлических корпусах по типу наших КБГ.

Вопрос о допуске интервале рабочих температур для полиэтилентерефталатовых конденсаторов решается разными фирмами по-разному, как показывает табл. 15.

Таблица 15

Интервал рабочих температур для конденсаторов из пленки ПЭТФ

Название фирмы	$t_{\text{мин}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{макс}}, ^\circ\text{C}$	$t_{100\%}$	Допускаемое напряжение в % от $U_{\text{ном}}$ при $t_{\text{макс}}$
Тесла (ЧССР)	—55	155	125	87,5
Гуд Олл (США)	—65	150	—	—
Поттер (США)	—70	150	—	—
Филм Капациторс (США)	—55	125	85	70
Конденсер Продэктс (США)	—55	125	85	57
СТС (Англия)	—40	125	85	50
Стеафикс (Франция) . . .	—55	125	—	—
Эфко (Франция)	—55	125	100	56—62
Валво (ФРГ)	—40	100	85	87,5
Компани Жепераль де Конденсатер (Франция)	—40	85	—	—
Дукати (Италия)	—25	85	85	100

Предпоследний столбец табл. 15 показывает то значение температуры, при котором конденсатор еще может применяться при $U_{\text{ном}}$, а последний столбец показывает значение напряжения при максимальной температуре в процентах от $U_{\text{ном}}$. В тех случаях, когда указано $t_{\text{макс}}$, равное 150°C , снижение напряжения при этой температуре необходимо, но не всегда указывается в фирменной рекламе; в некоторых случаях при 150°C допускаемое напряжение составляет всего лишь 30% от номинального значения, установленного для температур не выше 85°C .

По результатам некоторых отечественных испытаний пленок лавсан, хостафан, майлар при длительной работе конденсаторов трудно обеспечить достаточную надежность, если температура превышает 125°C , даже при пониженной напряженности поля.

По проекту ТУ на конденсаторы из полиэфирной пленки, разработанному Техническим Комитетом № 40 Международной Электротехнической Комиссии (МЭК) в 1960 г., предусматривается, что конденсатор должен выдерживать номинальное рабочее напряжение до 85°C включительно; при 125°C допускается напряжение, равное 50% номинального, а при 140°C — равное 30%.

Ограниченный интервал температур по данным фирмы «Дукати» (табл. 15) обусловлен желанием обеспечить достаточную стабильность емкости конденсаторов: гарантируется, что при крайних значениях температуры изменение емкости не превышает 0,5%; в связи с этим ограничен и нижний предел температуры. У остальных фирм различие в значениях нижнего предела, вероятно, определяется только различными требованиями заказчиков, так как

физические свойства материала в пределах $-55 \div -70^\circ \text{C}$ не накладывают ограничений, если не считать необходимости некоторого расширения допуска на изменение емкости.

Зависимость емкости полиэтилентерфталатовых конденсаторов от температуры, по различным источникам, показана на рис. 80, а, при частоте 1 кГц. Емкость относительно мало изменяется с температурой в интервале от -20 до $+80^\circ \text{C}$; при температуре $-50 \div -60^\circ \text{C}$ снижение емкости может превышать 5%, а при температуре 125°C емкость возрастает на 10—15%; поэтому, если указывается верхний предел температуры 150°C , как это видно для некоторых фирм в табл. 14, то надо иметь в виду, что при этой температуре емкость конденсаторов будет уже достаточно сильно отличаться от номинала, установленного для комнатной температуры. Интересно отметить, что по американским источникам (кривые 1 и 2) изменения емкости при нагревании несколько меньше, чем по английским источникам; если это различие не случайно, то его следует объяснять различием в деталях технологии выработки пленки или термообработки конденсаторов, приводящим к различию в соотношении аморфной и кристаллической фаз.

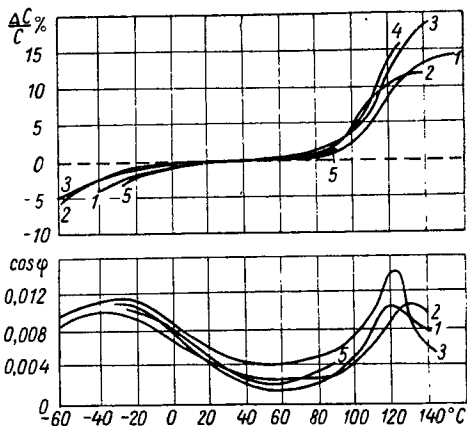


Рис. 80. Зависимость емкости и коэффициента мощности полиэтилентерфталатных конденсаторов от температуры при частоте 1 кГц, по различным источникам.

1 — по Вудли, Коману и Мак Магону (США); 2 — по Мистичу (США); 3 — по Дэммеру (Англия); 4 — по Козенсу (Англия); 5 — по каталогу фирмы «Дукати» (Италия).

Это подтверждается тем, что на рис. 80, б кривая 3 дает увеличенный высокотемпературный максимум, свидетельствующий об увеличенном содержании аморфной фазы.

Отклонение емкости от номинала, по проекту ТУ МЭК, составляет: ± 5 , ± 10 и $\pm 20\%$.

При частоте 1 кГц и температуре 20°C , по данным рис. 80, а, значения $\cos \varphi$ (то же, что $\text{tg } \delta$) лежат в пределах от 0,004 до 0,006. Обычная норма в рекламах разных фирм: от $\text{tg } \delta \leq 0,006$ до $\text{tg } \delta \leq 0,010$; иногда указывается значение 0,005 и даже 0,003, но это уже не может служить браковочной нормой. По проекту ТУ МЭК, $\text{tg } \delta$ должен быть не более 0,010.

Зависимость емкости и $\cos \varphi$ майларовых конденсаторов от частоты, при разных значениях температуры, по данным Мистича, показана на рис. 81. Изменения емкости не превосходят 2—3% в диапазоне частот до 0,1 МГц и при температурах $25-85^\circ \text{C}$; потери сохраняют относительно небольшое значение (до 0,01)

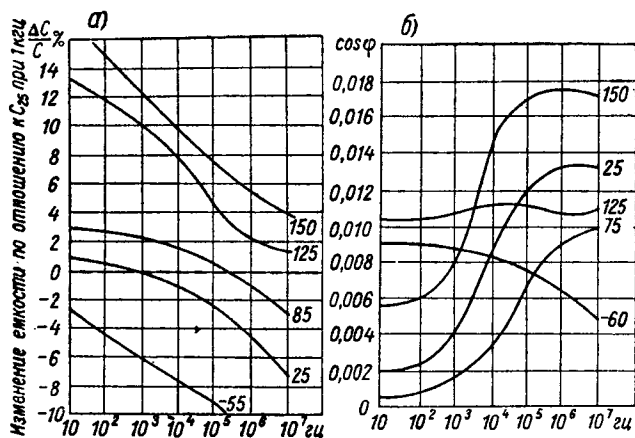


Рис. 81. Зависимость емкости (а) и коэффициента мощности (б) от частоты для майларовых конденсаторов при разных значениях температуры (по Мистичу).

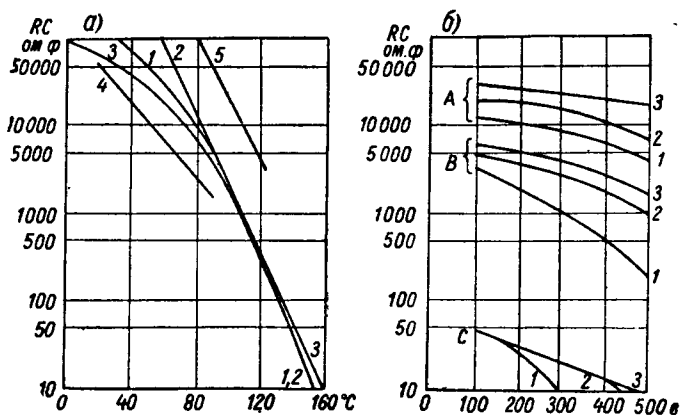


Рис. 82. Постоянная времени полиэтилентерфталатовых конденсаторов

а — зависимость постоянной времени от температуры.
 1 — по Вули, Коману и Мак Магону; 2 — по Рокету (США); 3 — по Дэммеру (Англия); 4 — по каталогу фирмы «Дукати» (Италия);
 5 — по каталогу фирмы «Конденсер Продактс» (США);
 б — зависимость постоянной времени от напряжения (по Мистичу)
 А — при 25° С; В — при 85° С; С — при 125° С; цифры у кривых указывают число слоев пленки 9 мк между обкладками.

в диапазоне частот от 1 Мгц только в области температурного минимума, при 40—80°С; при 25°С для того, чтобы сохранить указанное значение потерь, надо брать частоту не выше 10 кгц, а при 150°С — порядка 1 кгц.

Хотя потери у полиэтилентерефталатовых конденсаторов меньше, чем у ранее рассмотренных типов конденсаторов из полярных пленок, но все же они несколько выше, чем у лучших образцов бумажных конденсаторов, пропитанных жидкими неполярными массами.

Рис. 82, а показывает сводные данные о зависимости постоянной времени конденсаторов из пленки ПЭТФ от температуры. Разброс данных довольно велик: так, при 80°С значения RC колеблются в пределах от 3000 до 100 000 $\text{Мом} \cdot \text{мкф}$; отчасти этот разброс вызван тем, что на рисунке собраны как браковочные данные фирм (например, кривая 4), так и результаты измерений на отдельных образцах, возможно повышенного качества; отчасти разброс может быть вызван различием в технологии производства (разные режимы сушки и запекания). В каталогах и рекламах также указываются различные значения постоянной времени: от 16 000 до 100 000 $\text{Мом} \cdot \text{мкф}$ при 25°С; для сопротивления изоляции, при малых емкостях и той же температуре, указываются значения от 50 000 до 500 000 Мом . Проект ТУ МЭК указывает норму при 20°С для RC не менее 10 000 $\text{Мом} \cdot \text{мкф}$ и для $R_{из}$ не менее 30 000 Мом . По этой характеристике конденсаторы из пленки ПЭТФ значительно превосходят бумажные конденсаторы лучших типов. Указанные здесь значения относятся к кратковременной выдержке под напряжением, порядка 1—2 мин. Как показали Грэхем и Шмидт, увеличение времени выдержки приводит к значительному возрастанию постоянной времени. При температуре 21°С и выдержке под напряжением 87—260 в в течение 70 суток (диэлектрик: майлар $2 \times 6,25 \text{ мк}$, электроды — фольга, емкость 0,022 мкф) они получили значение порядка 100 000 000 $\text{Мом} \cdot \text{мкф}$; при 75°С и времени около 1 суток — порядка 400—800 000 $\text{Мом} \cdot \text{мкф}$; при 125°С постоянная времени лежала в пределах 150—300 $\text{Мом} \cdot \text{мкф}$ и уже слабо возрастала с увеличением времени выдержки.

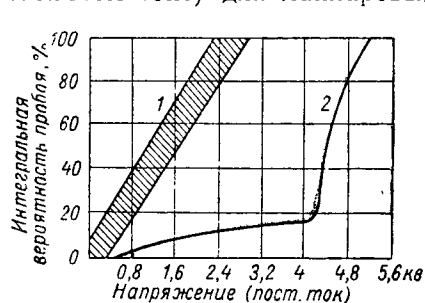
Рис. 82, б показывает зависимость постоянной времени майларовых конденсаторов от напряжения при трех значениях температуры и различным числе слоев пленки между обкладками, при толщине пленки 9 мк. Для однослойных конденсаторов снижение RC с ростом напряжения заметно усиливается в сравнении с 2—3-слойными, особенно при повышенных температурах. По проекту ТУ МЭК снижение RC в два раза соответствует повышению температуры на 14°С в диапазоне 20—85°С, на 9,3°С в диапазоне 85—125°С и на 8,5°С в диапазоне 125—155°С.

Коэффициент абсорбции полиэтилентерефталатовых конденсаторов значительно ниже, чем у бумажных, хотя и более высок, чем у конденсаторов с диэлектриком из неполярных пленок. По данным Мистича для майларовых конденсаторов при 20°С, времени зарядки 1 мин и времени закорачивания 1—2 сек измерение спустя

0,5—1 мин дает значение $k_a=0,1\%$. Максимальные значения, которые можно получить, увеличивая время между моментом замыкания обкладок и измерением остаточного напряжения, составляют 0,4—0,5%. Эти данные относятся к непропитанным запеченным конденсаторам. При пропитке кремний-органической жидкостью k_a возрастает до 2%. Для непропитанных конденсаторов k_a увеличивается с ростом температуры: при 0°C до 0,1%, при 40°C до 1% и при 100°C до 10%.

По отечественным данным при 20°C , времени закорачивания 5 сек и времени измерения 3 мин (после устранения короткого замыкания выводов) для полиэтилентерефталатовых конденсаторов получено: $k_a \approx 0,2 \div 0,8\%$.

На рис. 83 показан разброс пробивных напряжений (при постоянном токе) для майларовых конденсаторов, по данным Руби.



Конденсаторы — однослойные, с обкладками из фольги, емкостью 0,5 мкф. Заштрихованная область 1 дает разброс значений для толщины пленки 6,25 мк, полученный для 27 рулонов, поставленных за 9 месяцев; кривая 2 соответствует толщине пленки 12 мк. При такой толщине до напряжения 400 в пробоев не наблюдалось, в то время как при толщине 6,25 мк попадались даже секции с закороченными обкладками и значительное количество образцов (до 15—20% в отдельных партиях) пробивалось при напряжении 300—400 в.

Рис. 83. Разброс пробивного напряжения однослойных майларовых конденсаторов с обкладками из фольги. 1 — толщина пленки 6,25 мк; 2 — толщина пленки 12 мк.

Судя по этим данным, однослойные фольговые конденсаторы из пленки майлар могут изготавливаться при толщине пленки порядка 10—20 мк или выше; при малых толщинах пленки следует использовать металлизацию, чтобы устранить влияние слабых мест на электрическую прочность.

Були, Коман и Мак Магон сообщают, что средняя пробивная напряженность однослойных фольговых конденсаторов емкостью 0,2 мкф при толщине пленки 22 мк равна 160—240 кВ/мм, в то время как для более тонких пленок пробивная напряженность снижается до 80 кВ/мм. Выше мы отмечали, что при испытании пленок с электродами малой площади наблюдалась обратная картина — повышенные значения $E_{пр}$ при малых толщинах; это объясняется тем, что при малой площади электрода резко ослабляется влияние слабых мест, которые снижают электрическую прочность в конденсаторах с относительно большой площадью обкладок.

По данным тех же авторов сравнительное испытание бумажных и майларовых конденсаторов (вторые были однослойные и двухслойные) на срок службы дало следующие результаты: при 85°C

и $E_{\text{раб}} = 28$ кВ/мм бумажные конденсаторы давали срок службы 1000 ч или меньше; майларовые конденсаторы при $E_{\text{раб}} = 24$ кВ/мм и 130°C за 5000 ч не дали ни одного пробоя; после этого они также успешно выдержали испытание 4000 ч при 150°C .

По данным Руби, для однослойных конденсаторов с обкладками из фольги можно давать следующие значения напряжения при сроке службы 1 год (толщина пленки не указана): при 90°C — 250 в, при 130°C — 100 в и при 150°C — 75 в.

Мистич сообщает, что кратковременная электрическая прочность однослойных конденсаторов при толщине пленки 25 мк равна 200—240 кВ/мм; при испытании непропитанных секций при напряженности 26 кВ/мм и температуре 125°C в течение 250 ч было получено менее 10% пробоев. Для того чтобы получить срок службы порядка 1000—10 000 ч, надо снизить значение напряженности, пользуясь известной зависимостью:

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \left(\frac{E_2}{E_1} \right)^n, \quad (19)$$

где τ_1 и τ_2 — значения сроков службы, соответствующие значениям напряженности поля E_1 и E_2 , а показатель степени $n=5$. По данным Левенбаха, специально изучавшего вопрос о зависимости срока службы майларовых конденсаторов от напряженности поля, значение n может колебаться в пределах от 4 до 12, в зависимости от пределов E и от температуры испытания.

Снижение температуры позволяет повышать рабочую напряженность: так, при 85°C и сроке службы 250 ч допустимо 48 кВ/мм. Эти данные относятся к постоянному напряжению.

При переменном напряжении следует опасаться ионизации; при частоте 60 гц Мистич считает допустимым следующие значения: для однослойной пленки 25 мк — 24 кВ/мм, для диэлектрика 2×25 мк — 12 кВ/мм, для 6×25 мк — 4,8 кВ/мм и для 250 мк — 1,2 кВ/мм. Пропитка кремний-органической жидкостью позволяет повысить ионизирующее напряжение и соответственно увеличить рабочее напряжение переменного тока.

Допускаемое амплитудное значение переменной составляющей напряжения, в процентах от номинального напряжения постоянного тока, по проекту ТУ МЭК установлено равным: при 50 гц — 20%, при 100 гц — 15%, при 400 гц — 9%, при 1000 гц — 6% и при 10 000 гц — 1%. При этом сумма постоянной составляющей и амплитуды переменной составляющей не должна превосходить номинального значения рабочего напряжения.

Уайтман и Дойган, исследовавшие зависимость электрической прочности майлара от температуры при различных сроках службы, приводят следующее уравнение, связывающее эти характеристики:

$$\ln E_{\text{пр}} = -A\tau e^{-B/RT} + C, \quad (20)$$

где $E_{\text{пр}}$ — пробивная напряженность;
 τ — срок службы до пробоя;
 T — абсолютная температура;

R — универсальная газовая постоянная;
 A и B — постоянные коэффициенты;
 C — постоянная интегрирования.

По этим данным пробой с вероятностью 50% при некоторой толщине пленки и постоянном значении напряжения должен происходить за следующее время при различных температурах: 10 ч при 235°С, 100 ч при 195°С, 1000 ч при 160°С, 10 000 ч при 132°С и 100 000 ч при 108°С. Можно, однако, полагать, что эти данные соответствуют использованию пленки не в конденсаторах, а в изоляциях электромашин или аппаратов.

Левенбах приводит для зависимости сроков службы майларовых конденсаторов от температуры иную формулу:

$$\log_{10} \frac{\tau_2}{\tau_1} = C \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right), \quad (21)$$

где τ_1 и τ_2 — срок службы при одном и том же напряжении и температурах T_1 и T_2 (абсолютная шкала). Значение постоянной C , по его данным, может колебаться в пределах от 3000 до 8000.

Выше уже отмечалось, что при малых толщинах пленки целесообразно применять металлизацию. Металлизированные полиэтилентерефталатовые конденсаторы изготавливает сейчас ряд зарубежных фирм. Пленка легко металлизировается, как и конденсаторная бумага, но технология упрощается тем, что не требуется предварительной лакировки.

Для улучшения механического сцепления металла с пленкой как при металлизации испарением металла в вакууме, так и при контактировании секций путем напыления металла на их торцы, было предложено¹ производить частичную дезориентацию поверхности пленки путем ее локального нагрева. Рекомендуется следующая технология: сначала производится нанесение подслоя серебра, без подогрева пленки, при следующем режиме: толщина пленки 6 мк, остаточное давление в камере 10^{-1} торр, температура серебра в тигле 595—650°С, скорость движения пленки 27,5 м/мин, температура охлаждаемой водой подушки 20°С; далее пленка с серебряным подслоем нагревается с таким расчетом, чтобы при температуре основного объема пленки не выше 130°С температура ее поверхности достигала 200°С; в таком ее состоянии на нее наносят основной металл (медь, цинк, алюминий). После намотки секций из металлизированной пленки производится ее запекание; далее на торцы напыляется металл, частички которого должны иметь температуру 250—420°С, чтобы обеспечить нагрев поверхности пленки на торцах и частичную ее дезориентацию, позволяющую частицам металла внедряться в пленку на глубину 0,25—1,25 мк. Для металлизации торцов удобно применять сплав: олово-свинец с соотношением компонентов от 45:55 до 55:45. Сплав должен быть нагрет до 290—340°С; сжатый воздух, подающийся при давлении 7 кг/см², должен иметь температуру 370—425°С.

Зависимость емкости металлизированного полиэтилентерефталатового конденсатора от температуры, показанная на рис. 84, не имеет существенных отличий от аналогичной характеристики для фольговых конденсаторов, показанной на рис. 80. По данным Делла Джиованна в диапазоне температур 25—70°С для металлизированных конденсаторов из пленки ПЭТФ получено $\text{ТКЕ} =$

¹ Патент США, кл. 317—260, № 2921246, 12.01.60; Д. Пек, П. Робинзон.

$= +250 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$; в диапазоне $100-150^\circ \text{C}$ величина ТКЕ в 10 раз выше. Для $\text{tg} \delta$ приводятся значения: при $25^\circ \text{C} - 0,004$, при $80^\circ \text{C} - 0,007$ и при $120^\circ \text{C} - 0,015$; это — максимальное значение; далее $\text{tg} \delta$ падает с ростом температуры; постоянная времени при температурах ниже 35°C составляет выше $100\,000 \text{ Мом} \cdot \text{мкф}$, при 90°C она равна $1000 \text{ Мом} \cdot \text{мкф}$ и при $125^\circ \text{C} - 50 \text{ Мом} \cdot \text{мкф}$. По данным английской фирмы STC, металлизированные конденсаторы из пленки мелинекс рассчитаны на работы в интервале температур от -40°C до $+125^\circ \text{C}$; допускаемое напряжение: при $85^\circ \text{C} - 100\%$ от номинального, а при $125^\circ \text{C} - 50\%$; при 150°C допускается работа в течение 3000 ч при 40% номинального напряжения; допуск по емкости $\pm 20\%$; номинальная емкость: $0,05-2 \text{ мкф}$; пиковое напряжение — 375 в; угол потерь при 900 гц — не выше 0,01; постоянная времени при выдержке 1 мин и напряжении 85 в — не ниже $15\,000 \text{ Мом} \cdot \text{мкф}$ (сопротивление изоляции для малых емкостей не ниже $50\,000 \text{ Мом}$).

Сравнивая эти данные с рис. 82, можно увидеть, что для металлизированных конденсаторов постоянная времени немного снижена в сравнении с фольговыми, особенно при высоких температурах. Однако величина RC у таких конденсаторов все же много выше, чем у металлобумажных, особенно однослойного типа.

Эффективное значение ϵ для майларовых фольговых конденсаторов равно 2,6 (по Минстичу), т. е. заметно ниже, чем у пропитанной бумаги. Тем не менее возможность применения пленки в один слой, а также возможность повышения рабочей напряженности в сравнении с бумажным конденсатором позволяет полу-

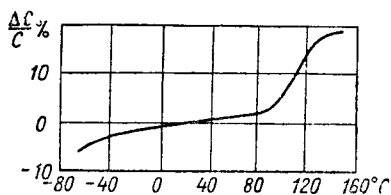


Рис. 84. Зависимость емкости от температуры для металлизированного майларового конденсатора фирмы «Поттер» (США).

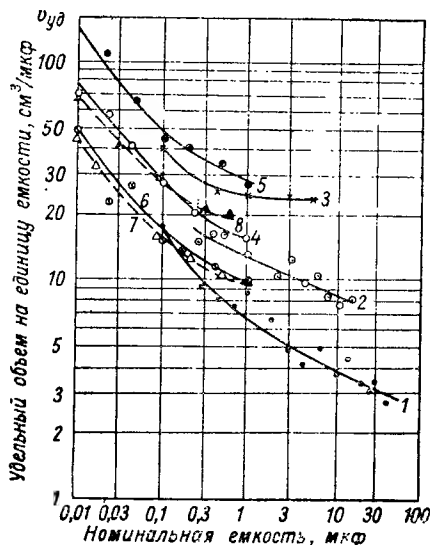


Рис. 85. Зависимость удельного объема полиэтилентерефталатовых конденсаторов, отнесенного к единице емкости, от номинальной емкости.

1 — металлизированные конденсаторы фирмы «Поттер» (США): 100 и 200 в; 2 — то же, 300 и 400 в; 3 — то же, 600 в; 4 — с обкладками из фольги, фирмы «Стеафлекс» (Франция) 63 в; 5 — то же, 250 в; 6 — с обкладками из фольги, фирмы «Гуд Олл» (США); 200 в; 7 — с обкладками из фольги, фирмы «Дукати» (Италия) 125 в; 8 — то же, 400 в.

чать с помощью пленки ПЭТФ меньшие значения удельных объемов.

Зависимость удельного объема, отнесенного к единице емкости, от номинальной емкости для ряда типов конденсаторов из пленки ПЭТФ, при различных значениях номинальных напряжений, приведена на рис. 85.

Преимуществом металлизированных конденсаторов является возможность расширить номинальные значения емкости однослойных конденсаторов в сторону больших емкостей, когда с увеличением площади обкладок особенно возрастает опасность случайного пробоя на слабом месте.

Характерно, что европейские фирмы, имеющие меньший опыт работы с полиэтилентерефталатом, при одном и том же удельном объеме дают меньшие допускаемые напряжения: так, практически совпадают кривые 6 и 7: в США номинальное напряжение 200 в, а в Италии 125 в; при значительно большем объеме французская фирма дает только 63 в.

Наименьшее значение удельного объема для металлизированных конденсаторов из пленки ПЭТФ при емкости 50 мкф составляет менее 3 см³/мкф.

Для металло-бумажного конденсатора типа МБГО емкостью 30 мкф имеем 3,13 см³/мкф: различие не очень велико, но пленка ПЭТФ дает в данном случае рабочую температуру не 60° С (как у МБГО), а 150° С. Для металло-бумажного конденсатора типа МБГТ на рабочую температуру 100° С (20 мкф и 160 в) удельный объем уже составляет 9,7 см³/мкф, т. е. более чем в 3 раза выше случая пленки ПЭТФ.

Майларовый фольговый конденсатор на 1 мкф и 200 в (кривая 6) имеет объем 10 см³; аналогичный конденсатор КБГ-МН имеет объем 39 см³; бумажный конденсатор КБГ-МН на 1 мкф и 400 в имеет объем 62,5 см³, а такой же итальянский конденсатор из пленки монтивель имеет 20 см³ (кривая 8). При этом у конденсаторов из пленки ПЭТФ, кроме малого объема и повышенной рабочей температуры, имеются и добавочные преимущества: повышенная постоянная времени и малый коэффициент абсорбции.

Эти преимущества в ряде случаев заставляют отдать предпочтение конденсатору из пленки ПЭТФ по сравнению с бумажным конденсатором, несмотря на меньшую стоимость последнего. В отдельных случаях полиэтилентерефталат может дать и экономическое преимущество перед конденсаторной бумагой, несмотря на повышенную стоимость диэлектрика конденсатора. Так, по сообщению фирмы Белл оказалось целесообразным заменить бумажные телефонные конденсаторы майларовыми, хотя в данном случае не требовалось высокой температуры и улучшения электрических свойств конденсатора. В этом случае вместо бумажного конденсатора в корпусе с влагозащитной заливкой были использованы запеченные секции из майлара без всякого дополнительного конструктивного оформления, поскольку в условиях работы телефонной аппаратуры гражданского типа влагостойкость таких секций вполне достаточна. Кроме упрощения конструкции было достигнуто и упрощение технологии, так как в отличие от бумажных конденсаторов майларовые наматывались не из двух слоев диэлектрика, а из одного слоя и не требовали пропитки. Расход фольги в этих конденсаторах также был меньше. В итоге стоимость майларового конденсатора оказалась ниже бумажного конденсатора, аналогичного по номинальным данным.

Вместе с тем не надо забывать, что при расширении рабочей температуры полиэтилентерефталатовых конденсаторов до 125—150° С емкость их резко возрастает, что далеко не всегда допустимо. Поэтому иногда приходится ограничивать верхний предел интервала температур величиной 85° С, чтобы сохранить небольшое отличие емкости от номинала. Кроме того, как уже отмечалось выше, угол потерь конденсаторов из пленки ПЭТФ выше, чем у бумажных. Поэтому представляло интерес разработать такую полярную пленку, которая не имела бы этих недостатков пленки ПЭТФ.

Такие пленки уже появились: это — упомянутая выше пленка терафилм, а также поликарбонатная пленка, которая в производстве конденсаторов вступает сейчас в конкуренцию с полиэтилентерефталатовой.

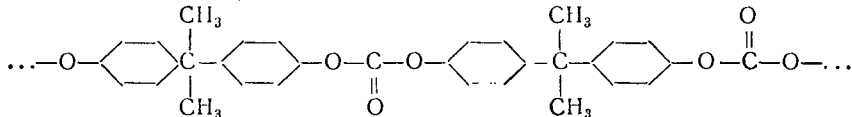
§ 16. Поликарбонатная пленка и первый опыт ее применения в конденсаторостроении

Поликарбонаты представляют собой полиэфиры угольной кислоты:

$$\begin{array}{c} \text{OH} \\ | \\ \text{C}=\text{O} \\ | \\ \text{OH} \end{array}$$

полученные при замещении гидроксильных радикалов, представляющими остатки молекул спиртов или кислот.

Сейчас практическое применение нашел себе 4,4-диоксифенил-2,2-пропан; структура молекулы этого полимера имеет вид:



Первые сведения о производстве электроизоляционной пленки из поликарбоната под названием «макрофоль» были сообщены фирмой «Байер» (ФРГ) в 1958 г. Указывалось, что пленка окрашивается фирмой в золотисто-желтый отличительный цвет и имеет следующие свойства:

Плотность	1,2 г/см ³
Временное сопротивление разрыву	800—900 кг/см ²
Удлинение	80—100%
Сопротивление раздиранию	высокое
Длительная нагревостойкость	140° С
Диэлектрическая проницаемость в диапазоне температур от —50 до +140° С и диапазоне частот 10 ² —10 ⁷ гц	ε = 3
Тангенс угла потерь при частоте 800 гц в диапазоне температур 20—140° С	tg δ = 10 ÷ 20 · 10 ⁻⁴
Удельное объемное сопротивление:	
при 20° С	4 · 10 ¹⁶ ом · см
при 100° С	8 · 10 ¹⁶ ом · см
при 150° С	6 · 10 ¹⁴ ом · см

Пробивная напряженность, по VDE 0303, при 50 кГц и 60 мкс равна 160 кВ/мм. Зависимость ε и tg δ для пленки макрофоль, по

данным фирмы, от температуры при частоте 800 гц показана на рис. 86, а и б. До температуры 120°С ϵ возрастает с температурой практически линейно, с температурным коэффициентом $+100 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$; угол потерь снижается при нагревании до 130°С, а дальше начинает возрастать с температурой как и ϵ . Судя по этим кривым, с точки зрения обеспечения стабильных электрических свойств для пленки, можно установить верхний предел температуры порядка 130°С.

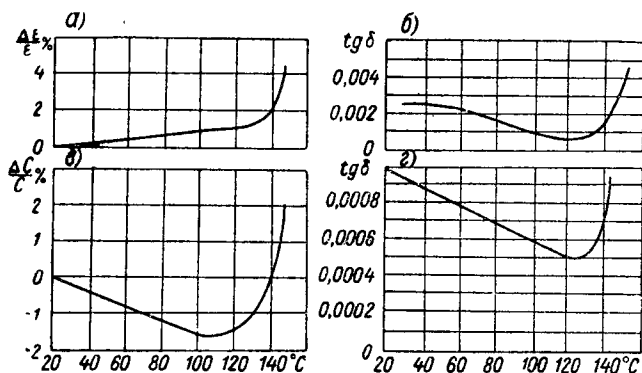


Рис. 86. Температурная зависимость некоторых электрических свойств поликарбонатной пленки и изготовленных из нее конденсаторов при частоте 800 гц:

а — зависимость ϵ пленки от температуры по данным фирмы «Байер»; зависимости $\text{tg } \delta$ пленки от температуры по тем же данным; в и г — зависимость ϵ емкости и угла потерь опытных поликарбонатных конденсаторов от температуры по данным Козенса.

Дополнительные данные о свойствах пленки указаны в обзорной работе Гёнингена; по его данным гигроскопичность пленки равна 0,6% (немного выше, чем у полиэтилентерефталата), а коэффициент влагопроницаемости составляет $6 \cdot 10^{-10} \text{ г/ч} \cdot \text{см} \cdot \text{торр}$. Влияние влажности на электрические свойства относительно невелико, как показывает табл. 16.

Таблица 16

Влияние влажности воздуха на электрические свойства поликарбонатной пленки макрофоль

Относительная влажность воздуха, %	Диэлектрическая проницаемость ϵ при 1 кгц	$\text{tg } \delta$ при 1 кгц	$\rho_{\text{ш}}$, ом·см
0	3,0	0,0012	10^{17}
50	3,0	0,0020	10^{16}
80	3,2	0,0025	10^{16}

Усадка после прогрева при 150°С составляет 1,5%. Величина ТК ϵ указана равной $+350 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, т. е. значительно выше, чем это следует по кривой рис. 86, а для линейного участка; вероятно, значение Гёнингена относится к более широкому диапазону

температур. Пределы толщины пленки от 10 до 200 $\mu\text{к}$, т. е. нижний предел выше, чем у пленки хостафан, очевидно, в связи с меньшей механической прочностью пленки.

Некоторые данные о сравнении поликарбонатной и ацетобутиратной пленок можно найти в работе Гофмейера. Поликарбонат имеет в сравнении с ацетобутиратом резко повышенные значения удельного объемного сопротивления и резко сниженный $\text{tg} \delta$ в диапазоне частот до 10^5 гц ; далее $\text{tg} \delta$ поликарбоната заметно увеличивается с ростом частоты и достигает значения порядка 0,01 при частотах порядка 1 Мгц и выше. Электрическая прочность поликарбоната также выше, чем у ацетобутирата, но более резко снижается с ростом температуры: если при 20°C соответствующие значения составляют 175 и 135 кв/мм , то при 150°C в обоих случаях получено 100 кв/мм . По данным Гофмейера выпускается два сорта пленки из поликарбоната: N и G. Сравнение их электрических свойств дано в табл. 17.

Таблица 17

Влияние частоты на ϵ и $\text{lg} \delta$ двух сортов поликарбонатной пленки

Частота, гц	Диэлектрическая проницаемость		Тангенс угла потерь	
	сорт N	сорт G	сорт N	сорт G
50	3,1	3,0	0,0025	0,0019
800	3,0	2,95	0,0020	0,0011
1 000 000	2,95	2,9	0,0087	0,0098

По предварительным данным для использования в конденсаторостроении намечается пленка сорта G. Рекомендуемая температура запекания 160°C . По-видимому, обозначение G относится к пленке, ориентированной вытягиванием (*gestreckt*) после отливки из раствора; указано, что при толщине 10 $\mu\text{к}$ для такой пленки установлен допуск $\pm 1 \mu\text{к}$.

Тэрнер сообщает следующие характеристики поликарбонатной пленки, по-видимому, относящиеся к продукту изготовления ФРГ: плотность 1,24 г/см^3 , временное сопротивление разрыву 660 кг/см^2 ; удлинение 80%, модуль упругости при растяжении $2,3 \cdot 10^4$ кг/см^2 , температура размягчения 165°C , гигроскопичность 0,3%, $\epsilon = 3,0$ и $\text{tg} \delta = 7 \cdot 10^{-4}$ (при частоте 50 гц и 20°C), удельное объемное сопротивление $4 \cdot 10^{15}$ $\text{ом} \cdot \text{см}$, пробивная напряженность при толщине 12 $\mu\text{к}$ — 360 кв/мм . Зависимость ϵ и $\text{tg} \delta$ от частоты и температуры по данным Тэрнера приведена в табл. 18.

Данные табл. 18 не вполне сходятся с данными на рис. 86, а и б, так как температурная зависимость характеризуется не увеличением, а небольшим снижением ϵ в области температур: 20 — 120°C ; возможно, что это вызвано погрешностью измерения, так как в пределах самой таблицы нет полного соответствия в значениях ϵ : например, при 10^3 гц и 20°C в верхней строчке указано значение 3,3, а в нижней — 3,1.

**Влияние частоты и температуры на электрические характеристики
поликарбонатной пленки по английским данным**

Частота, <i>гц</i>		60	10 ³	10 ⁴	10 ⁶
при 20° С	$\epsilon \text{ tg } \delta$	3,3 0,0008	3,3 0,0010	3,2 0,0045	2,8 0,0109
Температура, ° С		20	60	120	150
при 1000 <i>гц</i>	$\epsilon \text{ tg } \delta$	3,1 0,0010	3,0 0,0007	3,0 0,0007	3,1 0,0012

Имеются сведения, что выработка поликарбоната для его использования в электроизоляционных целях под названием «лексен» начата также в США. Для этого материала приводятся следующие данные: плотность 1,2 г/см³, временное сопротивление разрыву 630—735 кг/см², удлинение 60—100%, коэффициент линейного расширения $70 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, водопоглощаемость 0,3%, нагревостойкость 138—143° С, $\epsilon=3,17$, $\text{tg } \delta=0,0009$ (частота 60 гц); эти данные удовлетворительно согласуются с приведенными выше характеристиками пленки, изготовленной в ФРГ.

О производстве поликарбонатных конденсаторов можно найти некоторые сведения в обзорной работе Козенса, который приводит данные по опытным образцам, изготовленным из пленки производства ФРГ. По его данным, пленку можно получать с толщиной менее 20 мк, при высокой однородности. Верхний предел температуры для конденсаторов составляет сейчас 125° С, но, возможно, будет впоследствии повышен до 150° С.

Зависимость емкости от температуры показана на рис. 86, в; в отличие от приведенных данных об изменении ϵ пленки с температурой (рис. 86, а), емкость при нагревании до 110° С систематически снижается при значении $\text{ТКЕ} = -200 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. При температурах выше 120° С емкость резко возрастает с температурой, причем при охлаждении уже не возвращается к исходному значению.

Изменение угла потерь опытных конденсаторов с температурой (рис. 86, г) в основном соответствует по характеру аналогичной кривой для пленки (рис. 86, б), но абсолютные значения $\text{tg } \delta$ в области температур ниже 100° С на кривой рис. 86, г заметно ниже, чем на кривой рис. 86, б (для пленки). В отношении величины постоянной времени Козенс отмечает, что получение значения порядка 30 000 Мом · мкф при 20° С не представило никаких трудностей; при температуре 125° С значение постоянной времени снижалось до 50 Мом · мкф. Можно отметить, что для полиэтилентерефталатных конденсаторов при этом значении температуры постоянная времени составляет несколько сотен Мом · мкф (см. рис. 82, а).

Мак Лин, Уихи и Данте опубликовали результаты первых опытов по применению поликарбонатной пленки макрофоль для изготовления конденсаторов в США. Опытные конденсаторы изготовлялись плоскостиспрессованного типа с двумя слоями пленки по 10 мк и обкладками из фольги; емкость образцов 0,13—0,14 мкф. Запекание секций производилось в воздушном термостате в течение 2 ч

при подаче механического давления на секции порядка $0,15 \text{ кг/см}^2$. Температура запекания была выбрана равной 120°C ; при этом запеченные секции показали значения электрической прочности $240\text{—}280 \text{ кв/мм}$. При повышении температуры запекания (при той же выдержке 2 ч) электрическая прочность снижалась: запекание при 135°C дало $64\text{—}144 \text{ кв/мм}$, при 150°C дало $28\text{—}64 \text{ кв/мм}$, а после запекания при 165°C образцы оказались закороченными.

Результаты испытания опытных секций не вполне сходятся с данными Козенса: отмечается исключительно малое значение ТКЕ, равное $\sim 50 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ в диапазоне температур от комнатной до 130°C ; отмечается также, что постоянная времени поликарбонатных конденсаторов выше, чем у майларовых в $2\text{—}12$ раз, причем при повышении температуры преимущество поликарбоната над майларом усиливается. Значения тангенса угла потерь при частоте 1 кгц получены равными: $17 \cdot 10^{-4}$ при 0°C и $10 \cdot 10^{-4}$ при 100°C .

Были также проведены опыты по изготовлению однослойных секций (при той же толщине пленки 10 мк) из поликарбонатной пленки, металлизированной алюминием. При напряжении 50 в и 20°C получена постоянная времени $110\,000 \text{ ом} \cdot \text{ф}$; при 100°C $5000 \text{ ом} \cdot \text{ф}$. Значения тангенса угла потерь: при частоте 100 гц и температуре -55°C — $33 \cdot 10^{-4}$, при 20°C — $9 \cdot 10^{-4}$ и при 100°C — $6 \cdot 10^{-4}$. Изменения емкости по отношению к ее значению, измеренному при 1 кгц и 20°C , составляли: при -55°C — $1,1\%$, при -25°C — $0,37\%$, при 0°C — $-0,11\%$ и при 100°C — $-0,06\%$. Длительные испытания проводились при 200 в и $105\text{—}110^\circ \text{C}$; за 1000 ч большинство образцов увеличило постоянную времени (до 2 раз), но для одного образца она снизилась от $60\,000 \text{ ом} \cdot \text{ф}$ до $2800 \text{ ом} \cdot \text{ф}$; изменение емкости лежало в пределах $\pm 0,06\div 0,07\%$; в другом опыте, после 2600 ч было обнаружено снижение емкости на $0,96\%$. Металлизированные поликарбонатные конденсаторы пропитывались раствором полиэтилена в полиизобутилене.

Интересные данные были получены при изучении гигроскопичности поликарбонатной пленки макрофоль. Установившееся количество поглощенной влаги возрастало примерно пропорционально относительной влажности воздуха и при влажности 98% составило $0,45\%$. При испытании незащищенных двухслойных секций с обкладками из фольги постоянная времени не снижалась при значении относительной влажности 76% , когда поглощение влаги достигло $0,3\%$, хотя величина емкости увеличивалась при этом на $2,7\%$ при относительной влажности 98% емкость возросла на $3,7\%$, а постоянная времени резко снизилась от величины порядка $10^5 \text{ ом} \cdot \text{ф}$ до $10^2 \text{ ом} \cdot \text{ф}$.

В 1961 г. появились рекламные данные английской фирмы «Сэфлекс» о выпуске поликарбонатных конденсаторов малой емкости цилиндрического открытого типа (запеченных) с интервалом рабочих температур от -50 до $+125^\circ \text{C}$. Пределы номинальной емкости: при рабочем напряжении 125 в — от 100 пф до $0,047 \text{ мкф}$ и при 350 в — от 100 пф до $0,01 \text{ мкф}$.

Размеры конденсаторов: диаметр 5 мм , длина 12 мм (до $1500 \text{ пф} \times 125 \text{ в}$ или $470 \text{ пф} \times 350 \text{ в}$), диаметр 9 мм , длина 20 мм (до $0,01 \text{ мкф} \times 125 \text{ в}$ или $0,0035 \text{ мкф} \times 350 \text{ в}$) и диаметр $9\text{—}11 \text{ мм}$, длина 28 мм для наивысших значений

номинальной емкости. При этих значениях $C_{ном}$ минимальные значения удельного объема составляют: $143 \text{ см}^3/\text{мкф}$ при 125 в и $550 \text{ см}^3/\text{мкф}$ при 350 в . Как показывают данные рис. 85, для полиэтилентерeftалатовых конденсаторов при емкостях $0,01\text{--}0,03 \text{ мкф}$ можно получать значения много меньших удельных объемов; видимо, это обусловлено повышенными значениями толщины поликарбонатной пленки.

Допускаемое отклонение емкости от номинала указано для поликарбонатных конденсаторов равным: ± 5 ; $+10$ и $\pm 20\%$; $\text{ТКЕ} \approx +350 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Сопротивление изоляции при комнатной температуре — выше 10^6 Мом , тангенс угла потерь при частотах до $0,1 \text{ Мгц}$ — ниже $0,003$. Испытательное напряжение принято равным двойному номинальному. По-видимому, номинальное напряжение этих конденсаторов не снижается вплоть до верхнего предела рабочей температуры в отличие от полиэтилентерeftалатных конденсаторов.

Следует отметить, что поликарбонат хорошо поддается металлизации, не хуже полиэтилентерeftалата. Делла Джованна сообщает следующие данные о свойствах опытных металлизированных поликарбонатных конденсаторов: в пределах температуры от 25 до 70°C изменение емкости близко к линейному и $\text{ТКЕ} = +90 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$; в диапазоне $25\text{--}150^\circ \text{C}$ изменение емкости менее $2,5\%$ от исходного значения; постоянная времени — более $10^5 \text{ Мом} \cdot \text{мкф}$ при 25°C , $200 \text{ Мом} \cdot \text{мкф}$ при 140°C и $60 \text{ Мом} \cdot \text{мкф}$ при 150°C (это лучше, чем указывается для полиэтилентерeftалатовых конденсаторов на рис. 82, а); в диапазоне температур $25\text{--}50^\circ \text{C}$ тангенс угла потерь (вероятно, при 2 кгц) составляет $25 \cdot 10^{-4}$, при 130°C он проходит через минимальное значение, равное $6 \cdot 10^{-4}$, а при 150° увеличивается до $35 \cdot 10^{-4}$ (это лучше, чем для полиэтилентерeftалата, см. рис. 74 и 80). Указанные здесь результаты были получены при использовании пленки макрофоль.

Таким образом, при изготовлении опытных конденсаторов из поликарбонатной пленки макрофоль в Англии, США и Италии были получены противоречивые данные, особенно в отношении величины ТКЕ: указываются значения от -90 до $+350 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ (как показано в табл. 24, Гёнинген также приводит цифру $+350 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$); американские исследователи особенно подчеркивают, что малое значение ТКЕ (порядка $-50 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$) является одним из преимуществ поликарбонатной пленки, которая во всех этих случаях была получена от одной и той же фирмы «Байер»; более вероятно, что они вызваны различием в конструкции секций (цилиндрические или плоскопрессованные) и различными режимами процесса запекания, применявшимися разными авторами. Во всяком случае, можно отметить, что вопрос о величине ТКЕ поликарбонатных конденсаторов требует дополнительного исследования.

По величине угла потерь, по всем данным, поликарбонатная пленка имеет несомненное преимущество перед полиэтилентерeftалатной; по величине постоянной времени опытных конденсаторов большинство исследователей также отмечает некоторое преимущество поликарбонатных конденсаторов. Данные об их электрической прочности еще недостаточны для объективного сравнения с соответствующими характеристиками конденсаторов из полиэтилентерeftалатной пленки.

Пока еще трудно судить, в какой степени поликарбонат сможет конкурировать с полиэтилентерефталатом в конденсаторном производстве. Его преимуществом является большая стабильность диэлектрической проницаемости при повышенных температурах и меньший угол потерь в сравнении с обычным полиэтилентерефталатом. Однако новый тип пленки терафилм уже имеет заметно улучшенную стабильность емкости, хотя по величине $\operatorname{tg} \delta$ он все же хуже поликарбоната. Видимо, верхний предел температуры 125—150°С для поликарбонатных конденсаторов можно обеспечивать при меньшем снижении напряжения в сравнении с номиналом, чем для полиэтилентерефталатовых. Вместе с тем недостатком поликарбоната является повышенная толщина пленки.

Очевидно, при решении вопроса о широком применении этих двух пленочных диэлектриков в конденсаторостроении большую роль будет играть стоимость пленок в условиях их массового производства, а также возможность уменьшения нижнего предела толщины для поликарбонатной пленки.

По последним данным, этого можно достигнуть, используя принцип изготовления лакопленочных конденсаторов со снятой подложкой (§ 23).

§ 17. Проблема повышения диэлектрической проницаемости полярных синтетических пленочных материалов

Одним из основных преимуществ полярных пленок перед неполярными, с точки зрения их использования в конденсаторном производстве, является повышенное значение диэлектрической проницаемости, которое должно приводить к повышению удельной емкости и сокращению размеров конденсатора.

Однако, как было показано при рассмотрении свойств описанных выше полярных пленок, применяющихся в конденсаторостроении или предложенных для применения, величина ϵ у них относительно невелика и превышает значение этой характеристики для неполярных материалов всего в 1,5 и в лучшем случае, в 2 раза.

Известно, что увеличение полярности материала, связанное с увеличением его диэлектрической проницаемости, сопровождается также возрастанием его $\operatorname{tg} \delta$; однако при использовании конденсаторов в цепях низкой частоты, и тем более — при постоянном токе, увеличение потерь не будет таким фактором, который должен ограничивать возможности повышения величины ϵ . В случае жидких диэлектриков увеличение полярности и рост ϵ неизбежно влечет за собой рост проводимости диэлектрика за счет облегчения диссоциации ионогенных примесей; это ограничивает возможность повышать диэлектрическую проницаемость жидких диэлектриков; практически в конденсаторном производстве применяют лишь слабополярные жидкости, для которых $\epsilon \approx 5 \div 6$. В случае твердых диэлектриков это ограничение также отпадает. Что касается электрической прочности, то, согласно теории Фрелиха, для полярных диэлектриков, в частности для полярных полимеров, можно ожидать даже возрастания электрической прочности в сравнении с не-

полярными. Исследования внутренней электрической прочности полярных и неполярных полимеров подтвердили предсказание этой теории (рис. 87).

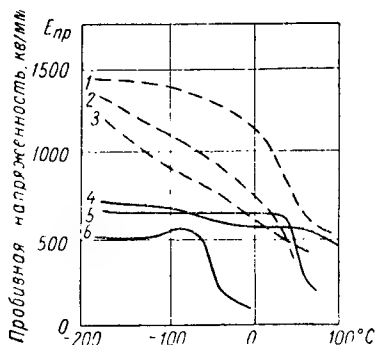


Рис. 87. Зависимость электрической прочности при внутреннем пробое от температуры для полярных полимеров (пунктир) и неполярных (сплошные кривые) по Уайтхеду.

1 — полиметилметакрилат; 2 — полихлорвинилацетат; 3 — хлорированный полиэтилен; 4 — полистирол; 5 — полиэтилен; 6 — полиизобутилен.

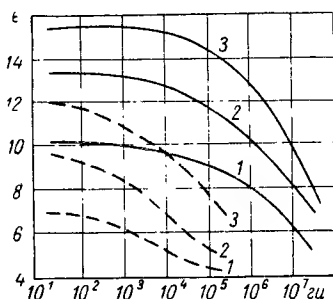
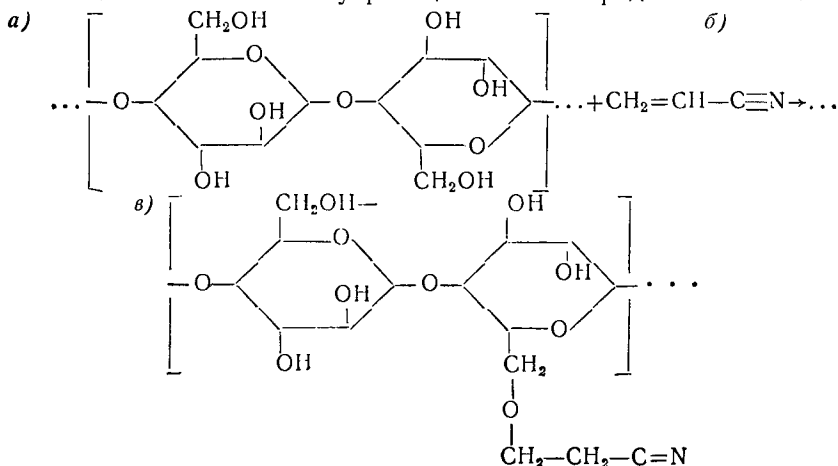


Рис. 88. Зависимость ϵ от частоты при 25° С (сплошные кривые) и при -53° С (пунктир) для шпан-этилированной целлюлозы.

1 — моноцетилацетилцеллюлоза; 2 — дицетилацетилцеллюлоза; 3 — трицетилацетилцеллюлоза.

Таким образом, имеются все основания к тому, чтобы, не опасаясь ухудшения других электрических свойств, добиваться повышения ϵ синтетических полимерных продуктов, пригодных для получения из них пленок для конденсаторостроения.

Работы, ведущиеся в этом направлении, уже начинают давать свои первые плоды. Еще в 1957 г. в американской литературе было опубликовано первое сообщение об относительно высоких значениях ϵ , которые можно было получить при цетилоэтировании целлюлозы. Схематически эту реакцию можно представить так:



здесь *a* — целлюлоза, *б* — акрилонитрил и *в* — частично цианэтилированная целлюлоза.

В зависимости от степени замещения гидроксильных групп в глюкозных кольцах целлюлозы можно получать: моноцианэтилцеллюлозу, дицианэтилцеллюлозу и трицианэтилцеллюлозу. При этом полярность полученного продукта и его ϵ возрастают, как показано на рис. 88.

При низкой частоте и комнатной температуре можно получить для трицианэтилцеллюлозы значение $\epsilon = 15,5$, т. е. резко увеличенное в сравнении с тем, что раньше удавалось получать для полярных полимеров. Повышение частоты приводит к снижению диэлектрической проницаемости, но для того чтобы вызвать резкое снижение ϵ при комнатной температуре, надо переходить в область частот, превышающих 10^4 гц, что для многих типов конденсаторов с полярным диэлектриком не требуется. При переходе в область низких температур ϵ уменьшается и ее зависимость от частоты усиливается. Все же, даже при -53°C , в области низких частот порядка $10\text{--}100$ гц еще можно получать ϵ порядка $10\text{--}12$ при использовании три- или дицианэтилцеллюлозы.

В 1960 г. появилось сообщение фирмы «Цианамид» (США) о выпуске нового типа полярной пленки с высокой диэлектрической проницаемостью под названием «цианосел». Пленка выпускается с толщиной от 2,5 до 125 мк и характеризуется следующими свойствами:

при частоте 1 кГц: $\epsilon = 13$ и $\text{tg } \delta$ менее 0,02;

при частоте 1 МГц: $\epsilon = 10$ и $\text{tg } \delta = 0,12$.

Сопоставляя эти данные о величине ϵ с кривыми на рис. 88, можно прийти к выводу, что данная пленка изготавливается на основе дицианэтилцеллюлозы. В обзоре по прогрессу в производстве гибких и полужестких материалов в США, опубликованном в 1960 г., указывается, что при толщине 50 мк и частоте 60 гц пленки из цианэтилированной целлюлозы имеют $\epsilon = 10 \div 15$ и $\text{tg } \delta = 0,010 \div 0,025$; пленки отличаются эластичностью и имеют удовлетворительную механическую прочность (375 кг/см^2 при относительной влажности 50%). Применение их в конденсаторах позволяет получить выигрыш в удельной емкости в 2—6 раз в сравнении с другими типами пленочных конденсаторов.

Сравнительно высокие значения $\text{tg } \delta$ пленок этого типа, которые и следовало ожидать, учитывая их большую полярность, не являются препятствием для их применения при изготовлении ряда типов конденсаторов. При этом указанный выше нижний предел толщины пленки 2,5 мк едва ли можно получать на свободных пленках, учитывая относительно невысокое значение временного сопротивления разрыву. Вероятно, такое значение толщины пленки уже будет требовать применения подложки, т. е. перехода к изготовлению конденсаторов тонкопленочного типа.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

КОНДЕНСАТОРЫ С КОМБИНИРОВАННЫМ ДИЭЛЕКТРИКОМ

§ 18. Общие принципы применения комбинированных диэлектриков в конденсаторах намотанного типа

При изготовлении намотанных конденсаторов с фольговыми обкладками на оправку намоточного станка наматываются две ленты металлической фольги, между которыми пропущены одна или более лент диэлектрика; такое же число лент диэлектрика

должно накладываться с наружной стороны на одну из лент фольги; если этого не сделать, то при первом же витке произойдет короткое замыкание обкладок. Если намотанную конденсаторную секцию размотать так, чтобы она превратилась в длинную плоскую ленту, и подать напряжение на обкладки, то в электрическом поле будут находиться только «внутренние» ленты диэлектрика, лежащие между обкладками, а «внешние», лежащие поверх одной из обкладок с наружной стороны, не будут подвергаться действию поля; в этом случае емкость будет примерно в 2 раза меньше, чем в намотанной секции, когда обе пачки лент диэлектрика расположены между обкладками и работают в электрическом поле, причем созданные ими емкости включены параллельно.

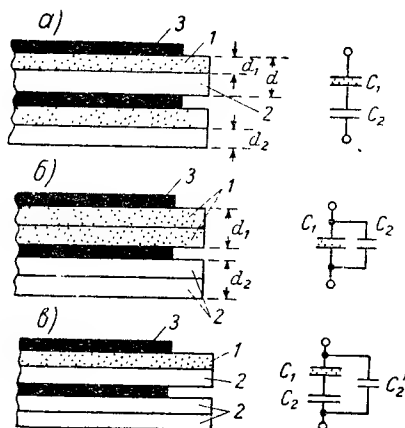


Рис. 89. Схемы включения слоев диэлектриков в комбинированных намотанных конденсаторах: *а* — последовательное; *б* — параллельное; *в* — смешанное включение.

1 — первый диэлектрик; 2 — второй диэлектрик; 3 — обкладка.

Таким образом, если мы хотим намотать двухслойный конденсатор, то надо использовать две ленты фольги и четыре ленты диэлектрика, взятые по две. Рассмотрим этот простой случай.

Обычно все четыре ленты диэлектрика изготовлены из одного и того же материала; однако можно взять ленты и из разных материалов. При этом, если взяты два разных диэлектрика, то можно получить два основных варианта намотки: 1) в двух парах (пачках) лент взято по два разных диэлектрика в каждой (рис. 89, а); 2) в каждой паре лент взяты одинаковые диэлектрики (рис. 89, б).

В первом случае получим конденсатор с комбинированным диэлектриком из последовательно включенных компонентов, а во втором — из параллельно включенных компонентов.

Как будет показано ниже, чаще используется первый вариант, т. е. последовательное включение, но в отдельных случаях оказывается целесообразным и параллельное включение; более того, иногда применяют даже смешанное включение, например, в одной пачке — две разные ленты диэлектрика, а в другой — две одинаковые (рис. 89, в).

Предположим двухслойную намотку из двух разных диэлектриков 1 и 2. Рассмотрим, как будут зависеть электрические свойства конденсатора в целом от значений электрических свойств отдельных его компонентов, образующих диэлектрик.*

А. Последовательное включение компонентов

1. *Эффективная диэлектрическая проницаемость комбинированного диэлектрика.* Обозначим емкость конденсатора через C , емкость, обусловленную слоем первого диэлектрика через C_1 и — второго диэлектрика через C_2 , получим:

$$C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}. \quad (22)$$

Если значения диэлектрических проницаемостей, соответствующие емкостям C , C_1 и C_2 , будут ϵ , ϵ_1 и ϵ_2 , толщина слоя первого диэлектрика d_1 , второго d_2 , а их сумма, т. е. толщина комбинированного диэлектрика d , то при площади обкладок, равной S , можем написать:

$$C = 0,1768 \cdot \frac{\epsilon S}{d}, \quad C_1 = 0,1768 \cdot \frac{\epsilon_1 S}{d_1}$$

и

$$C_2 = 0,1768 \frac{\epsilon_2 S}{d_2};$$

подставляя эти значения в выражение для емкости C и проводя сокращения, имеем:

$$\frac{\epsilon}{d} = \frac{\frac{\epsilon_1 \cdot \epsilon_2}{d_1 \cdot d_2}}{\frac{\epsilon_1}{d_1} + \frac{\epsilon_2}{d_2}}. \quad (23)$$

* Приведенные ниже формулы носят приближенный характер, так как не учитывают возможное наличие зазоров между слоями пленок и между пленкой и обкладкой.

Вводя обозначение $x = \frac{d_1}{d}$ (тогда $1 - x = \frac{d_2}{d}$) и проводя несложные преобразования, получаем окончательно:

$$\epsilon = \frac{\epsilon_1 \cdot \epsilon_2}{\epsilon_1 (1 - x) + \epsilon_2 x}; \quad (24)$$

здесь величина x представляет собой относительное значение толщины слоя первого диэлектрика по отношению к суммарной толщине комбинированного диэлектрика.

2. *Эффективное значение тангенса угла потерь комбинированного диэлектрика.* Применяя последовательную схему, вводим обозначения активных сопротивлений, эквивалентных потерям: r — для конденсатора в целом, r_1 — для первого диэлектрика, r_2 — для второго диэлектрика. Тогда значения тангенса угла потерь будут составлять соответственно:

$$\operatorname{tg} \delta = \omega C r; \quad \operatorname{tg} \delta_1 = \omega C_1 r_1 \quad \text{и} \quad \operatorname{tg} \delta_2 = \omega C_2 r_2,$$

где ω — угловая частота ($\omega = 2\pi f$, где f — в гц). Сопротивление r равно сумме сопротивлений r_1 и r_2 ; поэтому

$$\operatorname{tg} \delta = \omega \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} (r_1 + r_2) = \frac{C_2}{C_1 + C_2} \omega C_1 r_1 + \frac{C_1}{C_1 + C_2} \omega C_2 r_2. \quad (25)$$

Выражая значения емкостей через величины диэлектрических проницаемостей и относительные толщины слоев и используя выражения для $\operatorname{tg} \delta_1$ и $\operatorname{tg} \delta_2$, окончательно получаем:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\epsilon_2 \operatorname{tg} \delta_1}{\epsilon_1 \frac{(1-x)}{x} + \epsilon_2} + \frac{\epsilon_1 \operatorname{tg} \delta_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2 \frac{x}{(1-x)}}. \quad (26)$$

3. *Эффективное удельное объемное сопротивление комбинированного диэлектрика и сопротивление изоляции конденсатора.* Предполагаем, что сопротивление изоляции конденсатора определяется только величиной удельного объемного сопротивления, т. е. пренебрегаем поверхностными утечками. Тогда для значений сопротивления изоляции конденсатора в целом и слоев диэлектриков, взятых в отдельности, можно написать:

$$R_{из} = \rho_v \frac{d}{S}, \quad R_1 = \rho_1 \frac{d_1}{S} \quad \text{и} \quad R_2 = \rho_2 \frac{d_2}{S}.$$

Учитывая, что сопротивления R_1 и R_2 включены последовательно, получаем:

$$R_{из} = R_1 + R_2; \quad \rho_v d = \rho_1 d_1 + \rho_2 d_2. \quad (27)$$

Используя значение относительной толщины слоя первого диэлектрика x , имеем:

$$\rho_v = x \rho_1 + (1 - x) \rho_2. \quad (28)$$

Тогда для сопротивления изоляции конденсатора в целом можно написать:

$$R_{из} = [x\rho_1 + (1-x)\rho_2] \frac{d}{S} = \frac{d_1\rho_1 + d_2\rho_2}{S}. \quad (29)$$

Здесь ρ_1 и ρ_2 — соответственные значения удельных объемных сопротивлений первого и второго диэлектрика в $\text{ом} \cdot \text{см}$; если значения d_1 и d_2 выражены в см , а величины площади обкладок S — в см^2 , то значение $R_{из}$ получим в омах . Поскольку мы имеем дело с намотанным конденсатором, у которого объемная утечка будет в 2 раза больше, чем у плоского (развернутой ленты), в качестве значения S надо подставлять удвоенное значение произведения длины обкладки на ее ширину.

4. *Распределение напряжения между слоями комбинированного диэлектрика при переменном напряжении.* Переменное напряжение распределится между слоями диэлектриков, включенных последовательно, обратно пропорционально емкостям этих слоев. Обозначая напряжение, подведенное к конденсатору, через U и его составляющие на первом и втором слое через U_1 и U_2 , имеем:

$$U = U_1 + U_2 \quad (30)$$

и

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{C_2}{C_1}. \quad (31)$$

Решая эти два уравнения, находим:

$$U_1 = U \frac{C_2}{C_1 + C_2} \quad \text{и} \quad U_2 = U \frac{C_1}{C_1 + C_2}. \quad (32)$$

Используя значения диэлектрических проницаемостей и относительной толщины слоя первого диэлектрика, получим окончательно:

$$U_1 = U \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1 \frac{(1-x)}{x} + \epsilon_2} \quad \text{и} \quad U_2 = U \frac{\epsilon_1}{\epsilon_1 + \epsilon_2 \frac{x}{(1-x)}}. \quad (33)$$

5. *Распределение напряжения между слоями комбинированного диэлектрика при постоянном напряжении.* Постоянное напряжение распределится между слоями диэлектриков, включенных последовательно, прямо пропорционально сопротивлениям изоляции этих слоев:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}. \quad (34)$$

При этом значения составляющих напряжения на первом и втором слоях будут соответственно равны:

$$U_1 = U \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad \text{и} \quad U_2 = U \frac{R_2}{R_1 + R_2}. \quad (35)$$

Используя значения удельных объемных сопротивлений и относительной толщины слоя первого диэлектрика, окончательно получаем:

$$U_1 = U \frac{\rho_1 x}{\rho_1 x + \rho_2 (1-x)} \text{ и } U_2 = U \frac{\rho_2 (1-x)}{\rho_1 x + \rho_2 (1-x)}. \quad (36)$$

Б. Параллельное включение компонентов

1. *Эффективная диэлектрическая проницаемость комбинированного диэлектрика.* В общем случае толщина слоя первого диэлектрика d_1 может быть не равной толщине слоя второго диэлектрика d_2 . Обозначаем отношение $\frac{d_1}{d_2} = y$. В данном случае мы имеем два составляющих конденсатора: из первого диэлектрика C_1 и из второго C_2 , емкости которых включены параллельно и образуют полную емкость всего конденсатора C .

Для того чтобы найти эффективное значение диэлектрической проницаемости, предполагаем, что конденсатор намотан из однородного диэлектрика с диэлектрической проницаемостью ϵ и толщиной (расстоянием между обкладками), равной полусумме толщин составляющих диэлектриков:

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}. \quad (37)$$

В этом случае можно написать:

$$C = C_1 + C_2 = 2C'; \quad \frac{\epsilon_1}{d_1} + \frac{\epsilon_2}{d_2} = 2 \frac{\epsilon}{d}. \quad (38)$$

Отсюда эффективная диэлектрическая проницаемость будет равна:

$$\epsilon = \frac{1}{4} \left(\epsilon_1 + \frac{d_2}{d_1} \epsilon_1 + \epsilon_2 + \frac{d_1}{d_2} \epsilon_2 \right) = \frac{1}{4} \left(\epsilon_1 + \frac{1}{y} \epsilon_1 + \epsilon_2 + y \epsilon_2 \right). \quad (39)$$

Если взять $d_1 = d_2$, т. е. $y = 1$, то выражение упрощается и принимает вид:

$$\epsilon = \frac{1}{2} (\epsilon_1 + \epsilon_2), \quad (40)$$

т. е. в этом случае эффективное значение ϵ комбинированного диэлектрика представляет собой среднее арифметическое из значений ϵ_1 и ϵ_2 .

2. *Эффективное значение тангенса угла потерь комбинированного диэлектрика.* В данном случае удобнее использовать параллельную эквивалентную схему; вводим обозначения активных сопротивлений, эквивалентных потерям: R — для конденсатора в целом, R_1 — для первого диэлектрика и R_2 — для второго диэлектрика. Тогда значения тангенса угла потерь будут соответственно составлять:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega C R}, \quad \operatorname{tg} \delta_1 = \frac{1}{\omega C_1 R_1} \text{ и } \operatorname{tg} \delta_2 = \frac{1}{\omega C_2 R_2}.$$

Учитывая, что $C = C_1 + C_2$ и $R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$, можем написать:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \delta &= \frac{R_1 + R_2}{\omega (C_1 + C_2) R_1 R_2} = \frac{C_1}{(C_1 + C_2)} \cdot \frac{1}{\omega C_1 R_1} + \frac{C_2}{(C_1 + C_2)} \cdot \frac{1}{\omega C_2 R_2} = \\ &= \frac{C_1 \operatorname{tg} \delta_1}{C_1 + C_2} + \frac{C_2 \operatorname{tg} \delta_2}{C_1 + C_2} = \frac{\operatorname{tg} \delta_1}{1 + \frac{C_2}{C_1}} + \frac{\operatorname{tg} \delta_2}{1 + \frac{C_1}{C_2}}. \end{aligned} \quad (41)$$

Вводя значения диэлектрических проницаемостей и толщин диэлектрика, а далее значение отношения толщин y , получаем окончательно:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\operatorname{tg} \delta_1}{1 + \frac{1}{y} \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}} + \frac{\operatorname{tg} \delta_2}{1 + y \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}}. \quad (42)$$

Если значения толщин первого и второго диэлектриков одинаковы, т. е. их отношение $y = 1$, то выражение упрощается:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\operatorname{tg} \delta_1}{1 + \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}} + \frac{\operatorname{tg} \delta_2}{1 + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}}. \quad (43)$$

3. *Эффективное удельное сопротивление комбинированного диэлектрика и сопротивление изоляции конденсатора.* Так же, как и в предыдущем случае последовательного соединения, пренебрегаем поверхностными утечками. Сохраняя обозначения, принятые в п. Б, 1 при вычислении ϵ для схемы рис. 89, б, можем написать для значений сопротивления изоляции конденсатора в целом и слоев диэлектрика, взятых в отдельности:

$$R_{из} = \frac{1}{2} \rho_v \frac{d}{S}, \quad R_1 = \rho_1 \frac{d_1}{S} \quad \text{и} \quad R_2 = \rho_2 \frac{d_2}{S}.$$

В данном случае под величиной S понимается произведение из длины на ширину обкладки (не удваивается!), а под R_1 и R_2 — значения сопротивления изоляции слоев разных диэлектриков.

Поскольку значения R_1 и R_2 включены параллельно, можем написать:

$$R_{из} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad \text{или} \quad \frac{1}{2} \rho_v d = \frac{\rho_1 d_1 \cdot \rho_2 d_2}{\rho_1 d_1 + \rho_2 d_2}. \quad (44)$$

Подставляя значения $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$ и преобразовывая, получаем:

$$\rho_v = \frac{4 \rho_1 \rho_2}{\frac{1}{d_1} (\rho_1 d_1 + \rho_2 d_2) \frac{1}{d_2} (d_1 + d_2)} = \frac{4 \rho_1 \rho_2}{\left(\rho_1 + \frac{1}{y} \rho_2 \right) (1 + y)}, \quad (45)$$

где y представляет собой отношение толщин d_1 и d_2 ; при $y = 1$, т. е. при одинаковых толщинах первого и второго диэлектрика, получаем:

$$\rho_v = \frac{2 \rho_1 \rho_2}{\rho_1 + \rho_2}. \quad (46)$$

При этом сопротивление изоляции конденсатора с комбинированным диэлектриком определится выражением:

$$R_{из} = \frac{\rho_1 \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \cdot \frac{d}{S}, \quad (47)$$

где толщина диэлектрика $d = d_1 = d_2$ и площадь обкладки S вычисляется, как произведение из ее длины на ширину.

При использовании схемы рис. 89, б, т. е. при параллельном включении двух слоев различных диэлектриков, очевидно, что напряжение, приложенное к каждому слою, будет одно и то же как при переменном, так и при постоянном токе.

В практике современного конденсаторостроения известно применение комбинированных диэлектриков, составленных из полярной пленки и конденсаторной бумаги, неполярной пленки и конденсаторной бумаги и из полярной и неполярной пленок.

В первых двух случаях использование комбинированного диэлектрика, в основном, имеет целью повышение электрической прочности конденсатора; в третьем случае стремятся получить снижение температурного коэффициента емкости конденсатора. В связи с этим в первых двух случаях применяется последовательное включение слоев (рис. 89, а), а в третьем — параллельное или смешанное (рис. 89, б и в).

§ 19. Комбинированные конденсаторы с диэлектриком из полярной синтетической пленки и конденсаторной бумаги

Как уже отмечалось выше (§ 13), при разработке конденсаторов из полярной пленки фторопласт-3 (политрифтормонохлорэтилен) было установлено, что благодаря практической несмачиваемости этой пленки обычными типами жидких пропиточных масс произвести удовлетворительную пропитку секций не удастся, и между слоями пленки остаются воздушные включения, резко снижающие электрическую прочность, особенно длительную, даже при работе конденсатора в цепях постоянного тока.

Для устранения этого недостатка Т. Н. Протопопова предложила помещать между слоями пленки прослойки из конденсаторной бумаги, которые должны были служить в качестве «фитиля», всасывающего пропиточную массу, т. е. было сделано предложение об использовании комбинированного диэлектрика. Между пленкой и фольговой обкладкой «фитиль» не был нужен, так как для всасывания пропиточной массы в зазор в данном случае было достаточно смачиваемости фольги. Таким образом, при двух и трех слоях пленки были рекомендованы схемы расположения слоев комбинированного диэлектрика, показанные на рис. 90. При большем числе слоев пригоден тот же принцип.

Комбинированный диэлектрик позволил в данном случае при рабочем напряжении порядка нескольких киловольт и температуре 100° С применять рабочую напряженность поля порядка 60 кВ/мм (среднее значение, рассчитанное на суммарную толщину комбини-

рованного диэлектрика), что дало возможность получить снижение удельного объема в 2—2,5 раза в сравнении с аналогичными бумажными конденсаторами типа КБГ, рассчитанными на рабочую температуру до 70° С. Конденсаторы с таким типом комбинированного диэлектрика могли работать и при 125° С, но при условии снижения рабочего напряжения по сравнению с номинальным, установленным для 100° С.

Поскольку удельное сопротивление пленки фторопласт-3 при рабочих температурах 100—125° С примерно в 10—20 раз выше удельного объемного сопротивления пропитанной бумаги, распределение напряжения между слоями пленки и бумаги при постоянном токе обеспечивало такие малые значения $E_{\text{раб}}$ на бумажных лентах (при высоком среднем значении $E_{\text{раб}}$ для комбинированного диэлектрика в целом), что бумага могла удерживать и длительно работать при воздействии температур порядка 100—125° С. Попробуем вычислить фактические значения $E_{\text{раб}}$ для слоев пленки и бумаги при среднем значении $E_{\text{раб}}=60$ кВ/мм, используя расчетную формулу, приведенную в § 18 (п. А, 5).

Предположим, что мы используем три слоя пленки по 15 мк и два слоя бумаги по 7,5 мк; тогда $d_1=45$ мк, $d_2=15$ мк, $d=60$ мк и $x=45/60=0,75$. Принимаем $\rho_1/\rho_2=10$. Полное рабочее напряжение, приложенное к конденсатору: $U=60 \cdot 60=3600$ в.

Напряжение, приходящееся на слои пленки:

$$U_1 = U \frac{\left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)x}{\left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)x + 1 - x} = 3600 \cdot \frac{10 \cdot 0,75}{10 \cdot 0,75 + 0,25} = 3500 \text{ в,}$$

а напряжение, приходящееся на слои бумаги: $U_2=3600-3500=100$ в. При этом напряженность в пленке составит: $E_1=3500/45=77,5$ кВ/мм, а напряженность в слоях бумаги: $E_2=100/15=6,7$ кВ/мм.

Используя формулы § 18, находим для нашего примера и другие электрические свойства комбинированного конденсатора: эффективная диэлектрическая проницаемость (для пленки ϵ_1 принимаем равной 2,8 и для бумаги $\epsilon_2=4,0$):

$$\epsilon = \frac{2,8 \cdot 4}{2,8 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,75} = 3,05;$$

тангенс угла потерь комбинированного диэлектрика (принимаем значения $\text{tg } \delta_1=0,017$ и $\text{tg } \delta_2=0,003$, соответствующие частоте 50 гц и температуре 100° С):

$$\text{tg } \delta = \frac{4 \cdot 0,017}{2,8 \cdot \frac{0,25}{0,75} + 4,0} + \frac{2,8 \cdot 0,003}{2,8 + \frac{0,75}{4 \cdot 0,25}} = 0,014.$$

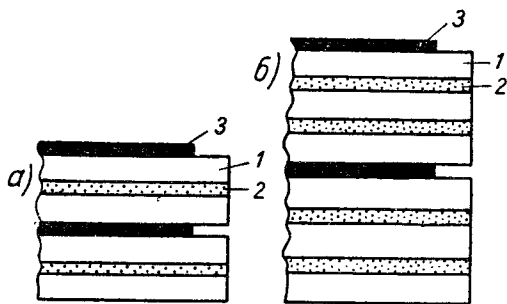


Рис. 90. Схемы расположения слоев синтетической полярной пленки и конденсаторной бумаги в комбинированных конденсаторах: а — конденсатор с двумя слоями пленки; б — конденсатор с тремя слоями пленки.

1 — синтетическая пленка; 2 — конденсаторная бумага; 3 — обложка из металлической фольги.

Таким образом, у комбинированного диэлектрика рассматриваемого типа диэлектрическая проницаемость несколько повышена, а угол потерь несколько снижен в сравнении с исходными данными для полярной пленки.

Постоянная времени несколько снижается по сравнению с чисто пленочным конденсатором не столько за счет наличия бумаги, сколько за счет пропитывающей жидкости, которая увеличивает утечку по закраинам конденсатора.

Сопоставление опытных данных о температурной зависимости постоянной времени и угла потерь чисто пленочных конденсаторов из пленки фторопласт-3 и комбинированного конденсатора дано на рис. 91.

Снижение угла потерь комбинированного диэлектрика в сравнении с расчетом вызвано наличием зазоров (см. прим. на стр. 151).

С использованием данного типа комбинированного диэлектрика была выпущена серия конденсаторов типа ПКГТ (пленочные комбинированные герметизированные теплоустойчивые), при небольших значениях емкости оформленных в цилиндрических керамических корпусах (по типу ФГТ-И), а при больших значениях — в сварных прямоугольных стальных корпусах; номинальные напряжения этой серии — от 3 до 20 кВ, номинальные емкости — от 0,001 до 2 мкФ; допускаемое отклонение емкости от номинала: ± 10 и 20% (для емкостей более 0,25 мкФ также и $\pm 5\%$); допускаемое значение амплитуды переменной составляющей по отношению к номинальному напряжению при работе в цепях пульсирующего тока не должно превышать: 20% при 50 Гц, 15% при 100 Гц, 10% при 300 Гц, 7% при 500 Гц, 5% при 1000 Гц и 2% при 5000 Гц; при этом сумма амплитудного значения напряжения пере-

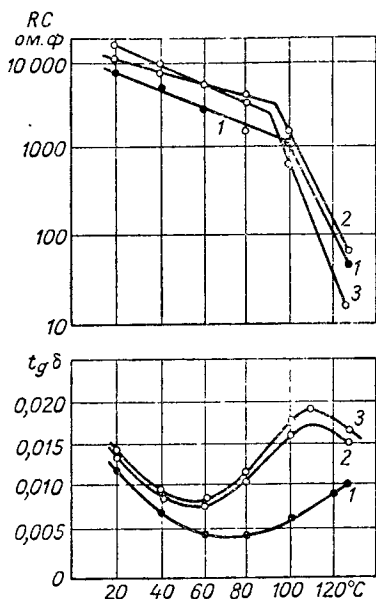


Рис. 91. Сравнение температурных зависимостей постоянной времени и угла потерь (при частоте 50 Гц) для комбинированного и чисто пленочного конденсатора из пленки фторопласт-3:

1 — диэлектрик: два слоя пленки и два слоя бумаги; 2 — диэлектрик: два слоя пленки; 3 — диэлектрик: три слоя пленки.

менной составляющей не должна превышать величины номинального напряжения постоянного тока.

Интервал рабочих температур для конденсаторов типа ПКГТ установлен равным от -60 до $+100^\circ\text{C}$. До 100°C конденсаторы могут работать при полном номинальном напряжении и сроке службы 500 ч; кратковременно (до 20 ч) допускается работа при 125°C также при номинальном напряжении и при 150°C при условии снижения напряжения до 60% от номинального; при снижении температуры до 70°C гарантируется срок службы не менее 5000 ч.

Изменение емкости при крайних пределах рабочей температуры не должно превышать $\pm 10\%$ (для интервала от -60 до $+100^\circ\text{C}$);

при 125°С изменение емкости должно быть меньше $\pm 15\%$, а при 150°С — меньше $\pm 20\%$. Тангенс угла потерь в нормальных условиях, при частотах 50 гц — 1 кц, должен быть не выше 0,01; постоянная времени при 20°С — не ниже 2000 Мом·мкф и при 100°С — не ниже 200 Мом·мкф (при емкостях ниже 0,2 мкф указываются минимальные значения сопротивления изоляции, соответственно, 10 000 и 1000 Мом).

Испытательное напряжение постоянного тока составляет 1,5 номинального. Для конденсаторов с рабочим напряжением 3 и 5 кв постоянного тока разрешается также работа (при переменном напряжении и частоте 50 гц) при следующих значениях эффективного напряжения: при $U_{ном}=3$ кв для емкостей 0,001—0,1 мкф — 800 в и для больших емкостей — 600 в; при $U_{ном}=5$ кв для емкостей 0,001—0,1 мкф — 1000 в и для больших емкостей — 800 в.

Как отмечалось выше, данная серия конденсаторов была разработана на пленке фторопласт-3 в комбинации с конденсаторной бумагой; впоследствии оказалось целесообразным заменить пленку фторопласт-3 пленкой типа лавсан (полиэтилентерефталат).

Предложение использовать комбинацию из полиэтилентерефталатовой пленки и конденсаторной бумаги было, по-видимому, впервые сделано в США в 1952 г., если судить по данным более позднего патента ФРГ,¹ бывшего в нашем распоряжении. Авторы указывают следующие преимущества комбинированного диэлектрика: в сравнении с чистобумажным — повышенная постоянная времени при высоких температурах и повышенный срок службы; в сравнении с чисто пленочным — меньший коэффициент мощности при повышенной температуре, более пологий ход температурной зависимости и повышенное ионизирующее напряжение. Толщина пленки может быть от 6,5 мк и выше; толщина бумаги от 7,5 до 25 мк. Как минимум, следует брать один слой пленки и один слой бумаги; авторы рекомендуют применять два слоя бумаги и между ними один слой пленки; при одном слое бумаги и двух слоях пленки бумага должна прилегать к фольге. Это мнение авторов патента противоречит высказанным выше соображениям и схемам рис. 90; вероятно, оно ошибочно, но, может быть, они полагают, что прилегание бумажной прокладки к фольговой обкладке способствует улучшению ионизационных характеристик (наличие пористой бумаги облегчает рассасывание газов, выделяющихся у краев обкладки в процессе ионизации, по сравнению с тем случаем, когда к обкладке прилегает пленка с малой газопроницаемостью). Однако, по нашему мнению, возможность создания воздушного мешка между слоями пленки за счет плохого втягивания пропиточной массы еще более опасно с точки зрения развития ионизации.

Авторы патента приводят результаты испытания опытных конденсаторов: а — чистобумажные с диэлектриком 3×10 мк; б — комбинированные с диэлектриком из двух слоев бумаги по 10 мк

¹ Патент ФРГ, кл. 21г. гр. 10/02, № 933 102, 22.09.1955, Р. Рушетта, Р. Дальтон (фирма Джэнеерал Электрик Ко).

и слоя пленки 6,4 мк и в — чистопленочные с диэлектриком $2 \times 12,5$ мк. Некоторые результаты этих испытаний приведены в табл. 19

Таблица 19

Результаты сравнительных испытаний бумажных, пленочных (майларовых) и комбинированных (майлар+бумага) конденсаторов

Тип	Пропиточная масса	Коэффициент мощности, %		Постоянная времени, Мом·мкф		Средний срок жизни, часы
		до старения	после	до старения	после	
а	Масло	0,43	4,3	51	18	2271
б	Не пропитан . .	0,64	0,52	52	102	3190
б	Масло	0,74	1,84	53	27	Выше 5800
б	Силикон	0,75	—	63	—	1200
в	Не пропитан . .	1,50	1,14	756	4080	Выше 6034
в	Масло	1,52	2,27	189	1410	Выше 6034
в	Силикон	1,56	1,23	273	2060	Выше 6034

Старение производилось при напряжении 1000 в постоянного тока и 125°C . Средние значения $E_{\text{раб}}$ для типа а: 33,3 кВ/мм, для б: 37,8 кВ/мм и для в: 40 кВ/мм; измерения проводились при 125°C , причем $\cos \varphi$ измерялся при 60 Гц, а RC — при 500 в; измерения для группы а — после старения 2170 ч, для группы б — после 3194 ч и для группы в — после 6034 ч; ионизирующее напряжение для комбинированных конденсаторов (группа б) составляло: для непропитанных 420 в, а для пропитанных маслом 1200 в; для чистопленочных конденсаторов как пропитанные, так и непропитанные образцы дали значение напряжения начала ионизации 900 в.

Данные табл. 19 не особенно убедительно подтверждают преимущества комбинированного диэлектрика: чистопленочные конденсаторы (группа в) ведут себя заведомо лучше при старении и показывают резко улучшенную постоянную времени; их недостатком является только несколько увеличенный угол потерь. По-видимому, в дальнейшем были проведены более обширные и убедительные исследования, подтвердившие преимущества комбинированного диэлектрика и способствовавшие его внедрению в практику американского, а затем и английского конденсаторостроения.

В настоящее время бумажно-майларовые (или бумажно-мелинексовые) конденсаторы выпускаются под маркой «бифилм» (двойная пленка) и рекламируются рядом фирм, а также часто упоминаются в обзорных работах по радиоконденсаторам.

В одном из таких обзоров, в частности, указывается, что комбинированный диэлектрик из одного слоя бумаги 9 мк и одного слоя майлара 9 мк обладает заметно улучшенной надежностью; срок его службы при напряжении 1200 в и 125°C ($E=66,5$ кВ/мм) в 10 раз выше, чем у чистопленочного и в 44 раза выше, чем у чистобумажного конденсатора.

По данным фирмы «Эль Менко» (США), комбинированные бумажно-майларовые цилиндрические конденсаторы (тип МРД) выпускаются со следующими пределами емкости: 0,015—0,5 мкф при 200 в, 0,0062—0,33 мкф при 400 в, 0,0018—0,25 мкф при 600 в, 0,001—0,1 мкф при 1000 в и 0,001—0,05 мкф при 1600 в; допускаемое отклонение емкости от номинала: стандартное ± 10 и 20%, но по специальному заказу можно обеспечить и более высокую точность. При 25°С и 1 кгц коэффициент мощности не более 0,01; постоянная времени при 25°С и емкости более 0,05 мкф — не менее 5000 Мом·мкф, а при 105°С — не менее 70 Мом·мкф; при меньших емкостях указывается допускаемая величина сопротивления изоляции: 100 000 Мом при 25°С и 1400 Мом — при 105°С. Надежность работы конденсаторов в разных условиях эксплуатации характеризуется данными табл. 20, в которой приводятся значения результатов испытания на срок службы в виде штук-часов на 1 случай пробоя при трех значениях температуры и различных испытательных напряжениях; эти данные, по-видимому, соответствуют испытанию группы конденсаторов с емкостью 1 мкф.

Таблица 20

Надежность работы комбинированных конденсаторов типа МРД (по рекламе фирмы «Эль Менко»)

Количество штук-часов на 1 случай выпada (емкость 1 мкф)	Напряжение при испытании в % от номинального		
	при 85°С	при 105°С	при 125°С
1000	270	220	175
10 000	185	170	140
100 000	150	130	115
1 000 000	120	100	80
10 000 000	90	80	70

В рекламе указывается, что пересчет с емкости 1 мкф к емкости 0,1 мкф показывает, что при испытании под номинальным напряжением при 125°С возможен один выпад на 14 433 600 штук-часов.

В американском патенте, выданном в 1960 г.¹ также на комбинированный конденсатор, кроме полиэтилентерефталатной пленки, оговаривается применение пленок и из других синтетических полярных материалов: поливинилиденхлорида, политрифтормонохлорэтилена и поликарбоната (а также и неполярного материала: политетрафторэтилена) в комбинации с конденсаторной бумагой, однако дается совершенно другое обоснование полезности комбинированного диэлектрика; патентуется составление диэлектрика из компонента, способного поглощать влагу конденсаторной бумаги, и компонента, практически не поглощающего влаги синтетической

¹ Патент США, кл. 317—260, № 2957114, 18.10.1960, В. Лампье.

пленки; такая система, по мнению автора патента, повышает влагостойкость конденсатора, обеспечивая одновременно его надежность в работе под напряжением.

Пример конструкции конденсатора с выступающей фольгой (алюминиевая фольга 6 мк толщиной, 16 мм шириной) на рабочее напряжение 200 в постоянного тока: один слой майларовой пленки 8,5 мк, шириной 15,5 мм, и один слой бумаги 6 мк, шириной 12,5 мм; края фольги выступают на 1,5 мм за края пленки, на 1,5 мм за края бумаги (рис. 92). Бумага прилегает с обеих сторон к обкладке одной полярности, а пленка — к обкладке другой полярности. Среднее значение $E_{\text{раб}} = 200/14,5 = 13,8$ кВ/мм.

При напряжении 600 в рекомендуется применить один слой пленки между слоями бумаги. Если сохранить ту же толщину лент бумаги и пленки, то получаем $E_{\text{раб}} = 600/20,5 = 29,3$ кВ/мм. Намотанная секция пропитывается подходящей твердой пропитывающей массой, например, поливинилкарбазолом, и опрессовывается фенопластом или помещается в изоляционную трубку, торцы которой заливаются компаундом. Такая конструкция конденсатора, не являясь герметичной, при предположенной системе намотки секций из комбинированного диэлектрика обеспечивает вполне удовлетворительную устойчивость при воздействии влажности. Конденсаторы описанной здесь конструкции с номинальным напряжением 600 в, емкостью 0,015,

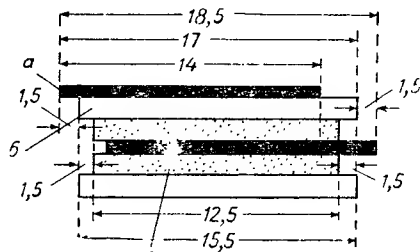


Рис. 92. Схема расположения слоев диэлектрика в комбинированном конденсаторе по патенту Лампье: а — фольга; б — синтетическая пленка; в — конденсаторная бумага.

0,047 и 0,1 мкф (по 6—12 шт. каждой емкости) успешно выдержали следующие испытания: 250 ч, 40° С при влажности 98% и 250 ч, 65° С, также при влажности 98%; после этого их сопротивление изоляции превышало 100 000 Мом. После пребывания 192 ч при 100° С и влажности 98% сопротивление изоляции лежало в пределах: 25 000—100 000 Мом. После пребывания 192 ч при 125° С и напряжении 900 в (1,5 $U_{\text{ном}}$, $E = 44$ кВ/мм) из 12 образцов один, емкостью 0,015 мкф, пробился; для других значений емкости не было ни одного пробоя. При повторном испытании аналогичных образцов при напряжении 900 в и 125° С в течение 500 ч все образцы выдержали испытание, кроме двух. Один, емкостью 0,015 мкф, пробился через 24 ч, другой, емкостью 0,0033 мкф, — через 240 ч (каждой емкости испытывалось по 12 шт.).

На рис. 93 дается сравнение влагостойкости обычных бумажных конденсаторов негерметического типа разной конструкции и комбинированных бумажно-майларовых конденсаторов, по данным фирмы Спрейг: конденсаторы одного и того же конструктивного оформления (прессованный корпус из фенопласта, пропитка твердой массой НСХ) в случае комбинированного диэлектрика (1) практически не меняют сопротивление изоляции за 2500 ч пребывания при тропической влажности (98%, 40° С), тогда как чисто бумажные (2) снижают сопротивление изоляции от 100 000 Мом до 40 000 Мом. Конденсаторы комбинированного типа с твердой пропиткой, защищенные погружением в компаунд на основе эпоксисмола (3), после 2500 ч испытания еще имеют сопротивление изоляции порядка 30 000 Мом; значительно худший результат дают бумажные конденсаторы: 4 — пропитанные воскообразным компаундом или маслом, в корпусе, прессованном из фенопласта; 6 — пропитанные твердой массой в корпусе из вошеного картона и 7 — пропитанные

воскообразным компаундом или маслом в корпусе из вошенного картона; недостаточно удовлетворительным оказывается и чисто-майларовый конденсатор в корпусе из прессованного фенопласта (5). Эти данные, по-видимому, подтверждают, что комбинированный диэлектрик дает улучшение влагостойкости намотанного конденсатора как в сравнении с чистобумажным, так и с чисто-пленочным (при условии применения негерметизированных конструкций).

Это можно объяснить тем, что небольшое количество влаги, проникающее через влагозащитное покрытие внутрь конденсаторной секции, захватывается целиком бумагой и не поглощается пленкой, которая сохраняет свои высокие характеристики; поскольку пленка включена последовательно с бумагой, ее удельное сопротивление практически определяет собой сопротивление изоляции конденсатора, и если ρ_v у пленки не меняется, то и $R_{из}$ конденсатора будет стабильным. Конструкция с худшей влагозащитой, поглощающие большее количество влаги, через некоторое время начинают снижать сопротивление изоляции (например, кривая 3 на рис. 93), так как после того, как бумага насытится влагой, последняя начинает поступать и в пленку. Вероятно, и для кривой 1 где-то наступит такой же перегиб, как для кривой 3, но уже при временах более 2500 ч. Чистопленочный конденсатор (кривая 5), аналогичный по конструкции чистобумажному конденсатору 2, дает худшие результаты потому, что он, видимо, не пропитан. Влияние типа пропитки на влагостойкость бумажных конденсаторов дает сравнение кривых 6 и 7: пропитка твердой полимеризующейся массой НСХ дает лучшие результаты, чем обычные типы пропитывающих масс (воскообразное вещество, масло).

На рис. 92 показано, что ширина пленки взята больше ширины бумаги; при этом должно ослабляться влияние поверхностной утечки на закраине увлажненной бумажной ленты на общее сопротивление изоляции конденсатора. Кроме того, если после пропитки производится прогрев для «запекания» секции, то края пленки

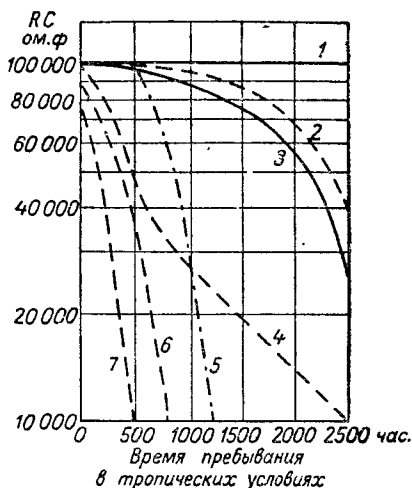


Рис. 93. Зависимость постоянного времени намотанных негерметических конденсаторов от времени пребывания в тропических условиях (температура 40°С, относительная влажность 98%).

1 — комбинированный диэлектрик, пропитка НСХ, корпус из прессованного фенопласта; 2 — бумажный диэлектрик, пропитка НСХ, корпус из прессованного фенопласта; 3 — комбинированный диэлектрик, пропитка НСХ, без корпуса (окунут в эпоксисмолу); 4 — бумажный диэлектрик, пропитка воск или масло, корпус из прессованного фенопласта; 5 — майларовый диэлектрик, корпус из прессованного фенопласта; 6 — бумажный диэлектрик, пропитка НСХ, корпус из вошенного картона; 7 — бумажный диэлектрик, пропитка воск или масло, корпус из вошенного картона.

могут сомкнуться и прикрыть торцы бумажных лент, что дополнительно замедлит поступление влаги в бумагу из окружающей среды. Эта идея послужила содержанием специального французского патента,¹ в котором оговаривается (правда, применительно к намотке со скрытой фольгой), что в комбинированном конденсаторе ширину бумажной ленты следует брать лишь не намного больше ширины фольги и заведомо меньше ширины синтетической пленки, чтобы обеспечить возможность спекания пленки на торцах конденсатора в процессе термической обработки. Выводные контакты рекомендуются при этом вкладывать между фольгой и бумажной лентой (вероятно, для того, чтобы уменьшить опасность повреждения пленки краями контакта).

В настоящее время можно считать, что идея использования полярной синтетической пленки в комбинации с бумагой завоевала себе право на жизнь, и ее вполне целесообразно использовать, когда величина рабочего напряжения пленочного конденсатора такова, что требуется применение пропитки.

§ 20. Комбинированные конденсаторы с диэлектриком из неполярной пленки и конденсаторной бумаги

В рассмотренных выше случаях комбинации бумаги с полярной синтетической пленкой угол потерь пленки превышал значение угла потерь пропитанной бумаги; поэтому для комбинированного диэлектрика мы получали $\operatorname{tg} \delta$ несколько ниже, чем для чисто пленочного (см. рис. 91). Комбинируя неполярную синтетическую пленку с конденсаторной бумагой, мы должны иметь обратную картину; наличие полярного компонента, бумаги, должно заметно ухудшить угол потерь комбинированного диэлектрика в сравнении с чисто пленочным. Если учесть, что малый $\operatorname{tg} \delta$ является одним из основных преимуществ пленочного конденсатора из неполярной синтетической пленки, то можно подумать, что нет смысла комбинировать такую пленку с конденсаторной бумагой.

Однако, если толщина бумажной прослойки будет значительно меньше, чем толщина слоя неполярной пленки, то ухудшение $\operatorname{tg} \delta$ может оказаться не настолько серьезным, чтобы полностью исключить возможность практического осуществления подобной комбинации.

Используя выражение для $\operatorname{tg} \delta$ комбинированного конденсатора из п. А, 2 в § 18, попробуем подсчитать величину угла потерь для бумажно-полистирольного конденсатора, при толщине бумаги 7 мк и двух слоях полистирольной пленки по 12 мк; принимаем для пленки $\epsilon_1=2,5$ и для бумаги $\epsilon_2=3,5$ (бумага плотностью порядка 0,9—1,0 г/см³, пропитанная чистым маслом). В нашем случае значение x будет равно: $24/31=0,775$ и, соответственно, $1-x=0,225$. Значения угла потерь принимаем: для пленки $\operatorname{tg} \delta_1=2 \cdot 10^{-4}$ и для бумаги $\operatorname{tg} \delta_2=15 \cdot 10^{-4}$. Тогда для комбинированного конденсатора в целом

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{3,5 \cdot 2 \cdot 10^{-4}}{2,5 \cdot 0,225/0,775 + 3,5} = \frac{2,5 \cdot 15 \cdot 10^{-4}}{2,5 + 3,5 \cdot 0,775/0,225} = \\ = 1,8 \cdot 10^{-4} + 2,6 \cdot 10^{-4} = 4,4 \cdot 10^{-4}.$$

¹ Франц. патент, кл. H01g, № 1152954, 27.02.1958, Ж. Бодри.

Таким образом, в данном случае угол потерь увеличился в сравнении с углом потерь для полистирола менее чем в 2,5 раза, что еще не опасно для ряда типов конденсаторов. Следует, впрочем, отметить, что взятое нами значение $\operatorname{tg} \delta_2$ соответствует частоте 50 гц; с ростом частоты угол потерь бумаги будет расти, а соответственно ухудшится и значение угла потерь комбинированного диэлектрика. Поскольку резкое возрастание $\operatorname{tg} \delta_2$ бумаги начинается только при частотах выше 10 кгц, до этого значения частоты угол потерь комбинированного диэлектрика будет еще иметь приемлемые значения. При частоте 1 Мгц для бумаги можно принять $\operatorname{tg} \delta_2 = 120 \cdot 10^{-4}$; тогда получим: $\operatorname{tg} \delta = 1,8 \cdot 10^{-4} + 20,6 \cdot 10^{-4} = 22,4 \cdot 10^{-4}$, т. е. возрастание более чем в 10 раз в сравнении с полистиролом. Если к этому еще добавить влияние потерь в обкладках, резко возрастающее с увеличением частоты, то можно заключить, что при частотах порядка $10^5 - 10^6$ гц бумажно-полистирольные конденсаторы уже не смогут себе найти широкого применения.

На изготовление бумажно-полистирольных конденсаторов был выдан английский патент еще в 1957 г.¹ Авторы отмечают, что преимуществами комбинированных конденсаторов этого типа перед полистирольными являются: облегченные пропитки, повышение электрической прочности и снижение ТКЕ. Для пропитки рекомендовано использовать специальное масло, не действующее на полистирол (например, масло марки SUN XX фирмы «Дюссек») или кремний-органическую жидкость. При двух слоях пленки по 12 мк и разделяющем их слое бумаги 7 мк были получены значения ТКЕ, лежащие в пределах $\pm 10 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ (обычно среднее значение для чистополистирольных конденсаторов: $-150 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, как было показано в § 4).

Таблица 21

Сравнение электрической прочности полистирольных и бумажно-полистирольных конденсаторов

Обозначение вариантов конструкции	Описание конструкции	Пробивная напряженность, кв мм	
		переменный ток	постоянный ток
1	Один слой пленки 12 мк	51	91
2	Два слоя пленки по 12 мк	57	—
3	Пленка 12 мк и бумага 7 мк	93	167
4	То же, но при разной ширине фольговых обкладок: 31 мм, прилегающая к пленке, и 37 мм, прилегающая к бумаге	120	—
5	То же, но обкладки поменялись местами	155	—
6	Пленка 12 мк и бумага 9 мк	125	140
7	Бумага 7 мк между двумя пленками по 7 мк	135	290

¹ Англ. патент, кл. 37, № 781763, 28.08.1957; Шэнь Цзу-энь, Дж. Хаггет.

**Сравнение коэффициента мощности и постоянной времени
бумажных, полистирольных и полистирольно-бумажных
конденсаторов**

Вариант конструкции по табл. 20	Коэффициент мощности		Постоянная времени, Мом·мкф
	при 50 гц	при 3 кгц	
Только бумага	0,00150	0,00500	10 000
Только пленка	0,00020	0,00020	200 000
Вариант 3	0,00040	0,00056	24 000
Вариант 5	0,00056	0,00120	21 000
Вариант 7	0,00025	0,00090	26 000

Электрические свойства опытных бумажно-полистирольных конденсаторов, полученные авторами патента, приведены в табл. 21 и 22. При переходе от чистополистирольных конденсаторов к бумажно-полистирольным пробивная напряженность при переменном токе возросла от 50—60 до 120—155 кВ/мм (в 2—3 раза), а при постоянном токе от 90 до 140—290 кВ/мм, т. е. также до 3 раз.

Постоянная времени бумажно-полистирольных конденсаторов резко снижена в сравнении с чистополистирольными, но все же в 2—2,5 раза выше, чем для бумажных конденсаторов. Вариант 7, для которого мы провели наш расчет величины $\operatorname{tg} \delta$, дал при частоте 50 гц опытное значение заметно меньше нашего расчетного ($2,5 \cdot 10^{-4}$ вместо $4,4 \cdot 10^{-4}$); это может быть объяснено, с одной стороны, возможным влиянием тонких прослоек масла, которое мы не учитывали в нашем расчете (прослойки могут снизить $\operatorname{tg} \delta$, если масло очень чистое; в противном случае могут даже появиться добавочные потери от междуслойной поляризации), а, с другой стороны, ошибкой авторов патента при изменении. При меньшем значении коэффициента x (варианты 3 и 5), равном $12/19 = 0,635$, расчет дает значение $5,8 \cdot 10^{-4}$, а опыт — значение $4—5,6 \cdot 10^{-4}$; такое сходжение можно считать более удовлетворительным. Зависимость $\operatorname{tg} \delta = f(x)$ показана на рис. 94.

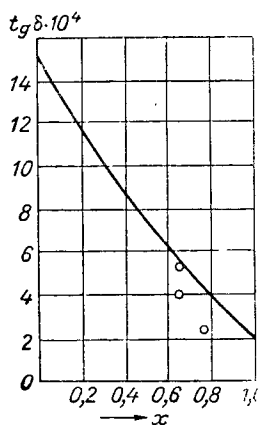


Рис. 94. Зависимость угла потерь (при частоте 50 гц) для бумажно-полистирольных конденсаторов от величины отношения толщины полистирольной пленки ко всей толщине комбинированного диэлектрика; кривая — получена расчетом, точки — взяты из патента.

ние 21 ч, далее сушка 5 ч также при 85°С, но под вакуумом (остаточное давление 0,1 торр); пропитка дегазированным маслом; фольга — алюминиевая, емкость образцов 0,1 мкф. Обращает на себя внимание указание патента, что при

использовании двух слоев пленки и одного слоя бумаги, последний должен располагаться между слоями пленки. Это понятно, так как мы уже отмечали раньше, что бумажный «фильтр» должен втянуть пропитывающую жидкость прежде всего в зазор между слоями пленки; в зазоре между пленкой и фольгой будет играть роль смачиваемость фольги. Указанное в табл. 21 влияние различия в ширине обкладок (при одном слое пленки и одном слое бумаги) на электрическую прочность — непонятно; вероятно, здесь просто сказались разброс значений пробивного напряжения.

В 1960 г. в США был выдан второй патент,¹ по существу, на то же самое предложение об использовании комбинации из бумаги и неполярной пленки. Хотя в патенте, кроме полистирола, упоминается также полиэтилен, а кроме конденсаторной бумаги, также стеклянная или асбестовая, но основные данные приводятся для бумажно-полистирольных конденсаторов.

Отмечается, что недостатками полистирольных конденсаторов являются низкая рабочая температура (70°С) и низкая электрическая прочность (при двух слоях пленки по 10 мк при напряжении 500 в, т. е. при 25 мв/мм, брак по пробую составляет 20–60%). Бумажно-полистирольные конденсаторы дают повышенную электрическую прочность и повышенную нагревостойкость (о втором преимуществе в первом патенте ничего не говорилось). Патент рекомендует после намотки секций из комбинированного диэлектрика подвергать их прогреву при температуре, превышающей на 15°С температуру размягчения синтетической неполярной пленки, производя прогрев под вакуумом и при подаче на секции механического давления. Бумага может подвергаться пропитке. Для таких конденсаторов авторы указывают пределы рабочей температуры от –55 до +155°С. Для полистирола верхний предел представляется завышенным; вероятно, в данном случае имеются в виду уже не бумажно-полистирольные, а бумажно-полиэтиленовые конденсаторы. По указаниям патента толщину синтетической пленки можно брать от 2,5 до 50 мк, а толщину бумаги не менее 4 мк (если она имеет плотность 1,05 г/см³ и будет подвергаться пропитке). Отношение толщины пленки к толщине бумаги должно лежать между 1:2 и 4:2. Пленка может располагаться с одной или с двух сторон бумаги. При постоянном токе соотношение толщин пленки и бумаги должно обеспечивать приложение не менее 75% (желательно до 90%) напряжения к пленке; при переменном токе отношение ε пленки к ε толщине должно быть в 2–3 раза меньше, чем для бумаги. Зависимости емкости бумажно-полистирольных конденсаторов плоскопрессованного и цилиндрического типа от температуры, по данным патента, показана

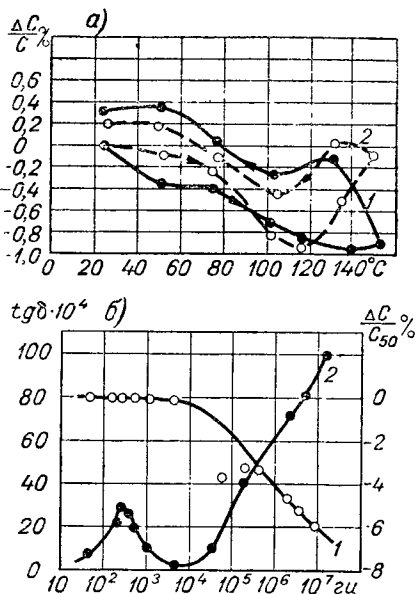


Рис. 95. Температурно-частотные характеристики бумажно-полистирольных конденсаторов:

а — зависимость емкости от температуры. 1 — конденсатор плоскопрессованного типа; 2 — цилиндрический конденсатор; б — зависимость емкости (кривая 1) и тангенса угла потерь (кривая 2) от частоты.

¹ Патент США, кл. 317-258, № 2935668, 3.05.1960, П. Робинзон, Д. Нек.

на рис. 95, а. При нагреве до 153°C изменение емкости по отношению к ее значению, измеренному при 25°C , оказалось менее 1%; несбратимые изменения после нагрева: $+0,2 \div 0,3\%$.

В табл. 23 приведены значения постоянной времени для различных комбинаций конденсаторной бумаги с неполярными пленками. Данные табл. 23 показывают, что при использовании полиэтилена в комбинации с бумагой постоянная времени конденсаторов заметно понижена в сравнении с бумажно-полистирольными конденсаторами, однако она все же много выше, чем у чисто бумажных конденсаторов.

Таблица 23

Постоянная времени различных комбинированных конденсаторов при повышенной температуре

Диэлектрик	Пропитывающая масса	Постоянная времени, <i>Мом·мкф</i>	
		при 125°C	при 150°C
Бумага $2 \times 7,5$ мк	Полиизобутилен	52	4,5
Бумага 7,5 мк и полистирол 10 мк	Без пропитки	1070	730
То же	Полиизобутилен	880	500
То же	Нефтяное масло	1260	—
Бумага 7,5 мк и полистирол 37,5 мк	Без пропитки	2400	210
То же	Полиизобутилен	1970	670
Бумага 25 мк и полиэтилен 37,5 мк	Без пропитки	425	180
То же	Полиизобутилен	340	250
Полистирол 10 мк между двумя бумажными лентами по 7,5 мк	То же	890	520
То же	Нефтяное масло	3700	—
Бумага 7,5 мк между двумя лентами полистирола по 10 мк	Без пропитки	22 000	3550

Испытание опытных бумажно-полистирольных конденсаторов с диэлектриком: полистирол 2×20 мк и бумага 2×10 мк, пропитанных вазелином, проведенное Е. А. Слукиным, показало, что при температуре 120°C среднее снижение емкости, в сравнении со значением измеренным при 20°C , составило менее 2%; зависимость емкости и угла потерь этих опытных конденсаторов от частоты показана на рис. 95, б. Как отмечалось выше, заметный рост угла потерь начался при частотах, превышающих 10 кГц; наличие максимума $\text{tg} \delta$ в диапазоне частот 100—1000 Гц требует дополнительной проверки.

Постоянная времени опытных конденсаторов при 20°C лежала в пределах от 25 000 до 80 000 *Мом·мкф*; при 120°C среднее значение составило 1800 *Мом·мкф*. Пробивная напряженность при постоянном токе (емкость образцов 0,12—0,18 мкф) зависела от температуры, при которой производилась вакуумная сушка перед

пропиткой: сушка при 70°C 8 ч дала значение 300 кВ/мм, сушка при 85°C 7 ч 250 кВ/мм и сушка при $110\text{--}120^{\circ}\text{C}$ 6 ч — 100—110 кВ/мм. Пропитка после сушки проводилась в течение 3 ч; остаточное давление при сушке и пропитке 0,5 торр.

Опытные конденсаторы, изготовленные при сушке на 85°C , успешно выдержали испытание 700 ч при 70°C и напряженности 50 кВ/мм (пост. ток); после этого они проработали без пробоев еще 400 ч при 85°C и том же значении напряженности. Таким образом, при работе порядка сотен часов напряженность 50 кВ/мм для таких конденсаторов допустима, если температура не превышает 85°C ; при больших значениях температуры и срока службы требуются дополнительные испытания.

И. И. Калганова и В. Д. Шадрин провели исследование опытных конденсаторов с комбинированным диэлектриком из полистирольной пленки 20 мк и конденсаторной бумаги марки КОН-2 толщиной 10 мк. В качестве обкладок использовались тонкие слои цинка, нанесенные испарением в вакууме, причем были обследованы два варианта: КМБ — образцы с металлизированной бумагой и КМП — образцы с металлизированной пленкой. При металлизации бумага предварительно (как обычно) покрывалась слоем эфироцеллюлозного лака толщиной 1 мк. Намотанные секции (номинальная емкость 0,5 мкФ) зажимались в струбины и проходили процесс запекания при 80°C в течение 2 ч. Перед запеканием на торцы секций напылялся контактный слой, к которому припаивались выводы. Запеченные секции собирались в герметизированном корпусе и проходили процесс вакуумной сушки и пропитки вазелиновым маслом; остаточное давление 0,1—0,2 торр и температура 80°C . После пропитки проводилась запайка пропиточных отверстий. Вазелиновое масло имело пробивную напряженность 24 кВ/мм, удельное сопротивление 10^{14} ом·см и $\text{tg}\delta \approx 2 \cdot 10^{-4}$ (1 кгц).

Увеличение емкости конденсаторов после пропитки составило 3,25% для КМП и 6,5% для КМБ. Электрические свойства для обоих вариантов имели близкие значения: постоянная времени при 20°C равнялась 10 000—35 000 ом·ф, тангенс угла потерь при 20°C и 1 кгц составлял 0,0025—0,0035. В интервале температур от 20 до 120°C величина $\text{TKE} = +20 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$ для КМБ и $+70 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$ для КМП. Номинальное рабочее напряжение для этих конденсаторов было равным 1000 в (пост. ток). При ступенчатом повышении напряжения от 1500 в через 100 в с выдержкой по 2 мин на ступени заметное снижение емкости (более 1%) для КМБ наблюдалось при 1900 в, а для КМП — при 2500 в. Конденсаторы успешно выдержали испытание в течение 500 ч при 1000 в и 80°C ; за первые 200 ч имело место увеличение емкости на 1,5—2%, после чего емкость стабилизировалась, постоянная времени осталась неизменной. Авторы полагают, что конденсаторы данного типа могут успешно работать при 80°C , а кратко-временно даже при 90°C . Удельный объем конденсаторов ока-

зался в 2,5 раза меньше, чем у аналогичных чистополистирольных конденсаторов.

Повышение верхнего предела рабочей температуры при комбинировании полистирольной пленки с конденсаторной бумагой, вероятно, объясняется тем, что пленка, размягчаясь, прилипает к бумаге, которая служит ей при этом механической поддержкой, а также уменьшает опасность прорезания ее краями фольги.

Можно полагать, что для бумажно-полистирольных конденсаторов, при осторожно выбранной рабочей напряженности постоянного тока, возможна работа при 100° С. Указанная выше температура 155° С, как уже отмечалось, явно завышена, но, может быть, окажется допустимой, если полистирол заменить полиэтиленом. При такой температуре бумажная составляющая комбинированного диэлектрика сможет работать при надежной герметизации, когда исключен доступ кислорода воздуха, и после тщательной сушки, когда удалена влага, способная вызвать гидролитическое разрушение бумаги. Соотношение толщин бумаги и неполярной пленки должно быть выбрано так, чтобы напряженность поля в бумаге была при этом достаточно мала.

При комбинировании бумаги с такой нагревостойкой неполярной пленкой, как политетрафторэтилен, очевидно, уже не удастся обеспечить для комбинированного конденсатора тот же верхний предел температуры, который можно получать для чистополитетрафторэтиленовых конденсаторов. Поэтому прибегают к комбинированию этой синтетической пленки с неорганическими волокнами (стекло-ткань или армирование пленки стекловолокном, см. выше § 8). Однако, если возможно пойти на снижение рабочей температуры, то в ряде случаев оказывается целесообразным комбинировать политетрафторэтилен (фторопласт-4) с металлизированной конденсаторной бумагой. Это позволяет получить свойство самовосстановления при пробе, которое иначе очень трудно обеспечить для пленки фторопласт-4, так как непосредственная металлизация такой пленки связана с большими технологическими трудностями, обусловленными плохой адгезией металла к поверхности этой пленки.

Комбинированный диэлектрик такого типа описан в патенте фирмы «Хэнт»,¹ причем отмечается, что в отличие от полученного ранее патента, в котором предусматривалось использование двусторонне металлизированной бумаги (исключающей воздействие поля на бумажный диэлектрик), в новом патенте предусматривается односторонне металлизированная; при этом сама бумага также подвергается воздействию поля и ее толщина входит в общую толщину диэлектрика. Очевидно, что в данном случае применимы все те рассуждения о величине угла потерь комбинированного диэлектрика, которые были приведены для случая бумажно-полистирольных конденсаторов; известные ограничения

¹ Англ. патент, кл. 37, № 795195, 21.05.1958, К. Дж. Вильямс, Р. К. Смит, П. Э. Грэхем.

верхнего предела рабочей частоты комбинированного конденсатора при наличии бумаги, попадающей под действие электрического поля, совершенно неизбежны.

Приведенные здесь данные показывают, что комбинация неполярной пленки с конденсаторной бумагой начинает находить себе техническое применение, хотя и в меньшей степени, чем комбинация бумаги с полярной пленкой.

§ 21. Комбинированные конденсаторы с диэлектриком из двух различных синтетических пленок

Когда для современной техники требуется конденсатор малой емкости с малым ТКЕ, то вопрос решается или использованием слюдяных конденсаторов группы Г ($\text{ТКЕ} = \pm 50 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$), или применением конденсаторов из термостабильной керамики группы М ($\text{ТКЕ} = -(30 \div 70) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ или группы Р ($\text{ТКЕ} = +(10 \div 50) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$). Комбинируя керамические конденсаторы, имеющие ТКЕ разного знака, можно получать и еще меньшие значения ТКЕ, близкие к нулю.

Сложнее обстоит вопрос, когда требуются конденсаторы большой емкости с малыми значениями ТКЕ, причем приходится применять намотанный тип конденсатора. Ранее в этом случае можно было пользоваться только бумажными конденсаторами, причем для снижения ТКЕ было предложено параллельное соединение двух секций, имеющих ТКЕ разного знака.¹ Изменение знака ТКЕ можно было получать, применяя бумагу разной плотности и подбирая тип пропиточной массы. При этом удавалось обеспечивать малые изменения емкости с температурой, порядка $\pm 0,2 \div 0,3\%$ в диапазоне температур от -30°C до 60°C . В области более низких температур ТКЕ принимал одинаковый знак (отрицательный) у обеих секций, и термокомпенсация нарушалась; при более высоких температурах возникала опасность появления значительных необратимых изменений емкости после нагрева. Воспроизводимость термокомпенсации у различных образцов одинаковой конструкции была недостаточно удовлетворительной.

В настоящее время эту задачу можно решать, используя синтетические пленки, позволяющие обеспечить термокомпенсацию в более широком диапазоне температур и с лучшей воспроизводимостью, чем при применении конденсаторной бумаги. В данном случае удобно использовать то обстоятельство, что пленки неполярного типа имеют отрицательные значения ТКЕ, а полярные пленки — положительные, как показывают сводные данные, приведенные в табл. 24. Некоторые неудобства представляет то, что, если для неполярных пленок зависимость ϵ от температуры близка к линейной, то для полярных пленок она может заметно откло-

¹ Авт. свидетельство СССР, «Бумажный конденсатор с температурной компенсацией», 1948, В. Т. Ренне.

няться от линейности, как показывают данные, приведенные в главе второй. Те же данные показывают, что цифры Гёнингена в табл. 24 надо рассматривать, как сугубо ориентировочные и требующие уточнения диапазона температур, на которые их можно распространять, особенно в случае пленок полярного типа (см. например, § 16).

Таблица 24

Средние значения температурных коэффициентов емкости конденсаторов с диэлектриком из синтетических пленок (по Гёнингену)

Тип пленки	Материал пленки	Значение $\text{TKE} \times 10^6$, град $^{-1}$
Неполярная	Полистирол	—150
"	Полиэтилен	—650
"	Политетрафторэтилен	—500
Полярная	Триацетат целлюлозы	+570—+1000
"	Политрифторхлорэтилен	+500
"	Поликарбонат	+350
"	Полипуретан	+430

Практические данные по применению комбинации из полярной и неполярной пленок можно найти в работе Мистича, откуда заимствованы кривые рис. 96.

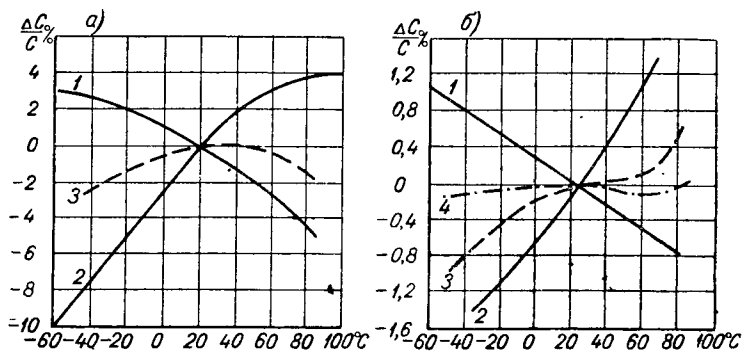


Рис. 96. Зависимость емкости от температуры для комбинированных пленочных конденсаторов из неполярной и полярной пленок:

а — комбинация из полиэтилена и ацетата.
 1 — полиэтиленовый; 2 — ацетатный; 3 — комбинированный конденсатор;
 б — комбинация из полистирола и майлара.
 1 — полистирольный; 2 — майларовый; 3 и 4 — комбинированные конденсаторы (3 — последовательное включение слоев полистирола и майлара; 4 — в одной пачке полистирол и майлар последовательно, к ней подключена параллельно вторая пачка только из полистирола).

На рис. 96, а показаны результаты комбинирования неполярной полиэтиленовой пленки с полярной ацетатной пленкой; полученный комбинированный конденсатор дает изменение емкости, не превышающее 2—2,5% в диапазоне температур от —40 до

+85°С; зависимость его емкости от температуры резко отлична от прямолинейной.

На рис. 96,б показаны результаты комбинирования неполярной полистирольной пленки с полярной майларовой (полиэтилен-терефталатной); при последовательном включении слоев полистирола и майлара получен комбинированный конденсатор, характеризующийся кривой 3; изменения емкости не превосходят $\pm 0,8\%$ в диапазоне от -40 до $+85^\circ\text{C}$; при сочетании последовательного соединения с параллельным удалось получить кривую 4, обеспечивающую в том же диапазоне температур изменение емкости не более $\pm 0,2\%$.

В данном случае конденсаторная секция наматывается из полярной и неполярной пленки, сразу на одну и ту же оправку. Это даст большое преимущество в сравнении с комбинацией из двух отдельных секций: намотанной из полярной пленки и намотанной из неполярной пленки (при параллельном соединении которых также можно получить термокомпенсацию). Преимущество заключается в том, что во втором случае термокомпенсация имеет место только тогда, когда обе секции прогреваются до одинаковой температуры, на что надо определенное время; в первом же случае прогрев обеих пленок происходит одновременно, поскольку они находятся в одной и той же секции. Поэтому термокомпенсация будет иметь место и в процессе прогрева конденсатора, а не только при установившемся тепловом режиме.

Подбирая комбинации из пленок разного типа и сочетания пленки при различном соотношении их толщины и схем включения слоев, можно получать пленочные конденсаторы с большим набором различных значений ТКЕ подобно тому, как это имеет место в производстве керамических конденсаторов. В частности, фирма Конденсер Продэктс (США) оговаривает в рекламе возможность поставки пленочных конденсаторов с заданным значением ТКЕ. Подобно тому, что мы имели в комбинированных конденсаторах из бумаги и неполярной пленки, при комбинации из неполярной и полярной пленок также возникает опасность ухудшения угла потерь, что надо иметь в виду, решая задачу создания термокомпенсированного пленочного конденсатора указанным здесь методом.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

§ 22. Проблема снижения толщины органических диэлектриков, применяемых в конденсаторостроении

Известно, что удельная емкость, рассчитанная на единицу объема конденсатора, в первом приближении пропорциональна отношению диэлектрической проницаемости ϵ к квадрату толщины диэлектрика d :

$$c_{уд} = k \frac{\epsilon}{d^2}. \quad (84)$$

Это выражение правильно, строго говоря, если относить емкость к активному объему диэлектрика, т. е. пренебрегать наличием закраин, толщиной обкладок и внешним конструктивным оформлением конденсатора. Если делить емкость на полный объем конденсатора, вычисленный по его наружным размерам, то мы будем получать меньшие значения, чем вычисленные по формуле (48). Отличие будет тем больше, чем меньше номинальная емкость конденсатора, так как с уменьшением емкости увеличивается различие между активным и полным объемом конденсатора. Именно поэтому удельная емкость растет с увеличением номинальной емкости, а обратная ей величина удельного объема снижается, как, например, показывает рис. 85.

Тем не менее можно все же считать, что для повышения удельной емкости конденсатора (или снижения его удельного объема) имеются два основных пути:

- а) повышение диэлектрической проницаемости;
- б) снижение толщины диэлектрика.

Поскольку в приведенном выше выражении значение толщины входит во второй степени, второй путь повышения удельной емкости представляется более эффективным. Действительно, несмотря на то, что для керамических диэлектриков удалось добиться весьма высоких значений ϵ , достигающих нескольких тысяч, большие значения минимальной толщины этих материалов, порядка 200—300 мк, вынуждают эти диэлектрики отступать перед бумагой и синтетическими пленками, когда требуются емкости порядка долей микрофарады и выше, несмотря на то, что указанные здесь

органические материалы имеют обычно значение менее 10; это превосходство органических материалов обусловлено именно тем, что они могут изготавливаться с малой толщиной при достаточной механической прочности, причем для бумаги достигнут сейчас нижний предел толщины порядка 4—6 мк, а для синтетических пленок — порядка 5—10 мк. Если считать, что в среднем такие органические материалы имеют минимальную толщину в 50 раз ниже минимальной толщины неорганических керамических материалов, то при равных значениях ϵ они могли бы обеспечить снижение удельного объема в $50^2 = 2500$ раз в сравнении с керамикой. Если принять среднее значение ϵ для органического материала равным 5 (ориентируясь на бумагу), то для того, чтобы получить такое же значение удельного объема, как при органическом материале, керамика должна иметь ϵ порядка $5 \cdot 2500 = 12\,500$. Но в настоящее время промышленные образцы конденсаторной керамики имеют ϵ примерно в 5 раз ниже, причем эти значения ϵ сопровождаются ухудшением таких характеристик, как $\text{tg} \delta$, ρ_v и $E_{\text{пр}}$.

Кроме того, надо учесть, что в случае керамики для получения больших емкостей приходится идти на сборку в параллель сравнительно большого числа элементов меньшей емкости, тогда как в случае органического материала в виде тонких лент, намотанных в рулоны, можно легко получить большие емкости в компактной форме намоткой конденсаторных секций на станках, т. е. механизированным методом.

До последнего времени конденсаторная бумага имела преимущество перед синтетическими пленками по нижнему пределу толщины, что объясняется особенностями изготовления бумаги. Ее основой является природный полимер — целлюлоза, который применяется в бумажном производстве в виде растительных волокон, преимущественно получаемых из древесины хвойных пород. Растительное волокно — относительно грубый структурный элемент с толщиной порядка десятков микрон; однако в процессе размола при изготовлении бумажной массы происходит расщепление растительного волокна на элементарные волокна-фибриллы, имеющие значительно меньшую толщину; кроме того, при каландрировании бумаги структурные ее элементы сплющиваются, превращаясь в плоские ленточки, что дает дополнительное уменьшение их толщины. Наличие гидроксильных групп в молекулах целлюлозы обуславливает появление так называемых водородных связей (рис. 97), что обеспечивает прочное сцепление структурных элементов бумажного листа и большую механическую прочность бумаги даже при малых толщинах. Как уже отмечалось выше, сейчас достигнуто значение толщины бумаги 4 мк; бумага такой тол-

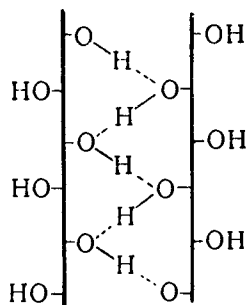


Рис. 97. Схема образования водородных связей между молекулами целлюлозы.

щины уже выпускается в виде относительно больших опытных партий; имеются также лабораторные образцы бумаги толщиной 3 *мк*.

Однако дальнейшее снижение толщины бумаги наталкивается на большие трудности. Несмотря на высокое значение временного сопротивления бумаги разрыву, т. е. величины отношения ее разрывающего усилия к толщине образца, абсолютные значения разрывающих усилий падают при снижении толщины; уже при толщинах порядка 4—5 *мк* возникают определенные затруднения при намотке, вызванные увеличением числа обрывов бумажных лент. Это заставляет переходить на использование специально сконструированных станков облегченного типа с меньшей производительностью намотки благодаря сниженной скорости. С другой стороны, по мере снижения толщины бумаги резко возрастает содержание в ней сквозных токопроводящих включений, которое, по данным Л. М. Вайсмана, примерно обратно пропорционально кубу толщины бумаги. Как известно, влияние этих включений можно сильно ослабить металлизацией бумаги, с отказом от использования фольговых обкладок. Однако перед металлизацией бумага должна подвергаться лакировке, а при малых толщинах начинается резкое увеличение числа обрывов бумажной ленты в процессе лакировки, так как смоченная лаком бумага дополнительно снижает свою прочность.

В производстве синтетических пленок используются совершенно иные технологические приемы, о которых мы уже говорили выше. Перечислим здесь основные из них, пользуясь данными работы Тэрнера:

1. Выдавливание с вытягиванием; применяется для полистирола; по данным Тэрнера, этим методом нельзя получить пленки тоньше 7,5 *мк*; обычно получается минимальная толщина 10 *мк*.

2. Выдавливание с выдуванием; применяется для полиэтилена и полипропилена. По данным Тэрнера, в принципе, позволяет получить толщины до 4 *мк*, хотя практически полиэтиленовые пленки вырабатываются с более высоким нижним пределом толщины, чем полистирольные.

3. Выдавливание с отливкой на вращающийся охлаждаемый барабан с последующим растягиванием для ориентации молекул (в виде дополнительной отдельной операции); применяется для полиэтилентерефталата; нижний предел толщины в настоящее время при этом методе достигнут для промышленных партий 6 *мк*.

4. Отливка из раствора (лаковый способ); применяется для эфиров целлюлозы; позволяет получать нижний предел толщины порядка 12—15 *мк*.

5. Отливка из эмульсии; применяется для политетрафторэтилена; так же, как и более старый метод снятия стружки на станке и последующего ее вальцевания, применяющийся для этого материала, позволяет получать нижний предел порядка 5—6 *мк*.

Таким образом, ни один из этих методов не дает в настоящее время возможности получить нижний предел толщины синтетиче-

ской пленки, равный нижнему пределу толщины бумаги; если учесть при этом, что обычные применяемые сейчас типы синтетических пленок не только неполярные, но даже и полярные, имеют ϵ ниже, чем у пропитанной бумаги, то станет ясным, что при малых напряжениях, когда толщина диэлектрика выбирается не по его электрической прочности (когда некоторые типы пленок могли бы иметь преимущество перед бумагой), а может быть взята равной минимальному технологически обеспечиваемому значению толщины, удельная емкость у бумажного конденсатора должна быть выше, чем у пленочного.

Возникает вопрос, нельзя ли приготовить синтетический материал не описанными здесь методами в виде пленок, а теми же методами, которые приняты в бумажном производстве, т. е. использовать синтетические материалы в волокнистой форме. Известно, что большинство синтетических материалов, которые идут на приготовление пленок, выпускается также и в виде синтетического волокна. Эти волокна имеют высокую механическую прочность благодаря сильной ориентации, большей, чем у пленок, и могут быть получены весьма малых толщин. Однако для того чтобы при отливе листа из таких волокон между ними имели место силы сцепления, способствующие образованию материала, аналогичного бумаге, без применения каких-либо дополнительных клеящих веществ, необходимо наличие водородных связей (или каких-либо других схожих с ними воздействий между молекулами), которые отсутствуют у обычных синтетических волокон. В принципе можно попытаться изготовить синтетические волокна с такими связями, можно также попытаться изготовить комбинированный материал типа бумаги из смеси целлюлозы с синтетическим волокном; в этом направлении ведутся исследования, например, в Англии, но они, по-видимому, еще не доведены до производственной стадии, во всяком случае при таких толщинах бумаги, которая требуется для конденсаторостроения.

Вместе с тем вопрос о снижении толщины органического материала для конденсаторов делается все более актуальным из года в год в связи с необходимостью работ по миниатюризации и микроминиатюризации электронной аппаратуры. Большую роль в этом вопросе играет широкое внедрение полупроводниковых приборов взамен радиоламп, позволяющее переходить от рабочих напряжений радиоcondensаторов, измеряющихся сотнями вольт, к напряжениям порядка десятков вольт и ниже.

При этом нижний предел толщины диэлектрика в ряде случаев уже не определяется соображениями его электрической прочности, как это было раньше, а лимитируется только технологическими возможностями. В связи с этим были начаты опыты по разработке такой технологии, которая позволила бы существенно снизить толщину синтетической пленки по сравнению с указанными выше значениями.

Оказалось, что для получения особо малых толщин пригоден тот из перечисленных методов получения синтетических пленок,

который до последнего времени считался в этом отношении наименее выигрышным, а именно — лаковый способ, характеризующийся отливкой пленки из раствора.

Перспективным в этом отношении является также метод отливки пленки из суспензии, близкий по своей технологии к лаковому методу.

Основным отличием, которое пришлось ввести в технологию для получения малых толщин пленки при использовании этих методов, явилось применение подложек для механической поддержки особо тонких слоев лака или суспензии; при этом механическая прочность самой синтетической пленки отступает на второй план, и толщина пленки может быть заметно снижена. Было предложено как применение подложек из электроизоляционных материалов: бумаги, или синтетической пленки, которые до нанесения на них тонкопленочного диэлектрика предварительно металлизируются для создания первой обкладки, так и металлической подложки: тонкой фольги, чаще всего алюминиевой, которая одновременно играет роль и первой обкладки; второй обкладкой в обоих случаях обычно является тонкий металлический слой, наносимый на тонкопленочный диэлектрик.

Конденсаторы, изготавливаемые первым методом, т. е. с электроизоляционной подложкой, можно называть лакопленочными конденсаторами; конденсаторы, изготавливаемые вторым методом, т. е. с металлической подложкой — металло-лаковыми или лакофольговыми конденсаторами. Оба эти направления в разработке тонкопленочных конденсаторов уже находят себе промышленное применение.

Следует отметить еще одно преимущество конденсаторов этих типов, кроме возможности обеспечить дополнительное снижение удельных объемов в сравнении с бумажными или обычными пленочными конденсаторами. При получении пленок методами, основанными на принципе выдавливания нагретого полимера с последующим вытягиванием его или выдуванием, требуется относительно сложное оборудование, создание и отладка которого сопряжена не только с затратой времени, но и больших средств, а также и достаточно больших количеств полимера для проведения экспериментальных работ по разработке технологии производства пленки. Поэтому нередко между появлением нового полимера в химической лаборатории и началом его производства в пленочной форме лежит период порядка нескольких лет. При этом оборудование, созданное для одного типа полимера, может оказаться непригодным для получения пленки из другого полимера; так, например, пленки из полистирола, полиэтилена и полиэтилентерефталата, как указано выше, пришлось изготавливать на различном оборудовании.

В то же время для изготовления тонкопленочных конденсаторов лаковым или суспензионным методом необходимо значительно более простое оборудование, пригодное для использования полимеров самых разнообразных типов; количество полимера, требую-

щиеся для отлаживания процесса изготовления тонкослойного диэлектрика, также относительно невелико. Все это способствует возможности быстрого опробования пригодности вновь разрабатываемых синтетических высокомолекулярных веществ в качестве конденсаторных диэлектриков. Более того, при наличии механической поддержки в виде электроизоляционной или металлической подложки можно использовать для конденсаторостроения и такие материалы, которые не позволяют изготавливать из них тонкие пленки в свободном состоянии; примером таких материалов является, например, полиуретан, который не находил себе применения в качестве пленочного конденсаторного диэлектрика, пока не был открыт принцип изготовления металло-лаковых конденсаторов.

§ 23. Лакопленочные конденсаторы

Разработка лакопленочных конденсаторов была выполнена в США работниками лаборатории фирмы Белл: Д. Мак Лином и Г. Уихи. Первое сообщение об этой работе было опубликовано еще в 1954 г., но патент был выдан значительно позднее.¹

Было предложено два основных варианта конструкции лакопленочных конденсаторов: а) со снятой подложкой и б) с сохраненной подложкой. В качестве подложки в обоих случаях применяется лакированная конденсаторная бумага. При изготовлении лакопленочных конденсаторов со снятой подложкой на лакированную сторону бумаги наносится тонкий слой «рабочего» лака, который должен иметь другую химическую природу, чем лак, покрывающий бумагу; оба эти лака приготавливаются с различными растворителями, причем растворитель «рабочего» лака не должен действовать на пленку лака, покрывающую бумагу.

Поверх слоя «рабочего» лака методом испарения в вакууме наносится тонкий металлический слой; во время этой операции пленка «рабочего» лака поддерживается подложкой. По окончании металлизации производится отделение тонкой металлизированной лаковой пленки от подложки, как показано схематически на рис. 98, и эта пленка наматывается в виде небольшого рулончика. При таком методе можно получать толщину пленки порядка 2,5 мк, т. е. значительно тоньше, чем до сих пор получались синтетические пленочные материалы.

Два таких рулончика надеваются на шпиндели специального намоточного станка облегченной конструкции и из них наматываются конденсаторные секции; обкладками служат тонкие слои металла на пленках, которые смещены к противоположным торцам секции, как при намотке однослойных металло-бумажных конденсаторов. Торцы секций покрываются слоем напыленного металла, к которому затем припаиваются выводные проводники.

¹ Патент США, № 2754230 от 10.07.1956, Д. Мак Лин, Г. Уихи; заявка сделана 25.10.1952.

Далее конденсатор тем или иным методом защищается от действия влаги.

При изготовлении лакопленочных конденсаторов с сохраненной подложкой конденсаторная бумага должна быть покрыта «защитным» лаком с обеих сторон и с обеих сторон металлизирована. После этого на нее, также с обеих сторон, наносятся пленки «рабочего» лака (рис. 99). Две такие ленты наматываются на бумажную трубочку, укрепленную на оправке намоточного станка; намотанная секция защищается от механических повреждений бумажной оберткой и снимается с оправки вместе с бумажной трубочкой. Контактное производство производится так же, как и в случае конденсаторов со снятой подложкой.

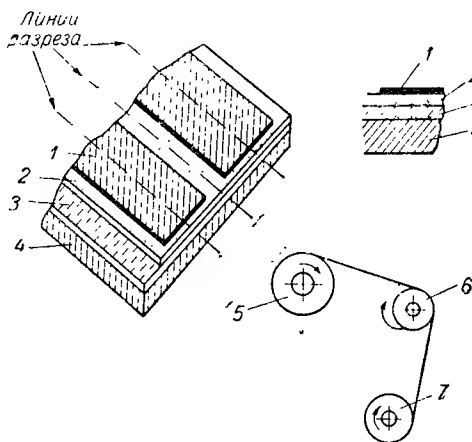


Рис. 98. Лакопленочный конденсатор со снятой подложкой.

1 — слой металла; 2 — диэлектрик (рабочий слой лака); 3 — защитный слой лака; 4 — бумага (подложка); 5 — рулон после металлизации (подложка с металлизированной рабочей пленкой); 6 — рулончик, на который сматывается тонкая пленка металлизированного диэлектрика (рабочего лака); 7 — рулон с подложкой после снятия с нее пленки рабочего лака с металлизированным слоем.

тем перешли к толщине 6,25 мк, по-видимому, для повышения механической прочности и уменьшения обрывов в процессе лакировки и при металлизации. Толщина слоя «защитного» лака от 0,5 до 1 мк. Толщина металлического слоя: от 0,02 до 0,1 мк; сначала наносится подслой серебра, затем поверх него слой цинка; металлизация ведется при остаточном давлении $1 \cdot 10^{-4}$ торр; среднее значение сопротивления металлического слоя 0,5 ом·см/см.

В работе Мак Лина и Уихи применялись два типа лаков: ацето-бутиратный и полистирольный. При изготовлении конденсаторов со снятой подложкой полистирольный лак наносился на бумагу в качестве защитного, а рабочий лак являлся ацето-бутиратный, который образовывал пленку, снимающуюся с подложки. Механическая прочность та-

кже с обеих сторон металлизирована. После этого на нее, также с обеих сторон, наносятся пленки «рабочего» лака (рис. 99). Две такие ленты наматываются на бумажную трубочку, укрепленную на оправке намоточного станка; намотанная секция защищается от механических повреждений бумажной оберткой и снимается с оправки вместе с бумажной трубочкой. Контактное производство производится так же, как и в случае конденсаторов со снятой подложкой. Толщина слоя «рабочего» лака так же, как и в предыдущем случае, составляет 2,5 мк.

Толщина конденсаторной бумаги была сначала принята равной 4,5 мк, но затем

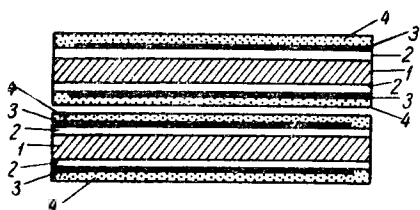


Рис. 99. Схема лакопленочного конденсатора с сохраненной подложкой (подложка экранирована).

1 — бумага; 2 — защитный лак; 3 — слой металла; 4 — рабочий лак (диэлектрик конденсатора).

кой пленки оказывалась достаточной, чтобы при толщине 2,5 мк ее можно было наматывать в рулончик (после металлизации на подложке) и затем сматывать с рулончика на станке при намотке секций. Этим методом получался лакопленочный миниатюрный конденсатор с пленкой полярного типа.

При изготовлении конденсаторов с сохраненной подложкой лаки менялись местами. Роль защитного лака играл наносимый на бумагу ацето-бутиратный лак, образующий полярную пленку, сходную в этом отношении с бумажной основой. При двухсторонней металлизации лакированной бумаги — как бумага, так и защитный лак оказывались заэкранированными и не попадали под действие электрического поля. Поверх металлизированного слоя наносился полистирольный лак, образующий рабочую неполярную пленку. Ввиду низкой механической прочности этой пленки, при той же толщине 2,5 мк нужна была сохраненная подложка для того, чтобы провести операцию намотки. Естественно, что при этом удельный объем конденсатора возрастал, но это была неизбежная цена за резко сниженный угол потерь конденсаторов, которые предназначались для замены слюдяных конденсаторов и в сравнении с последними являлись миниатюризованными.

Секция этого типа обертывалась защитной пленкой из полиэтилентерефталата и помещались в герметизируемые металлические корпуса, чтобы обеспечить высокую стабильность электрических характеристик.

Кроме схемы, показанной на рис. 99, для конденсаторов с сохраненной подложкой были предложены и другие варианты конструкции, приведенные на рис. 100. Вариант по рис. 100, а — подложка металлизуется с обеих сторон, причем слои металла на каждой стороне смещены в противоположные стороны; рабочий слой лака наносится только с одной стороны подложки; получается одноленточный конденсатор. Схема рис. 100, б — подложка металлизирована с одной стороны; поверх слоя металла нанесен рабочий лак, а поверх него второй слой металла; отличие этого варианта от предыдущего заключается в том, что совершенно отсутствуют зазоры между рабочим диэлектриком и обкладками (в предыдущем варианте с одной стороны рабочего диэлектрика, между ним и обкладкой, был зазор, снижающий емкость и ухудшающий ее стабильность). Конденсатор по рис. 100, в — многослойный; при этом варианте уменьшается относительная роль

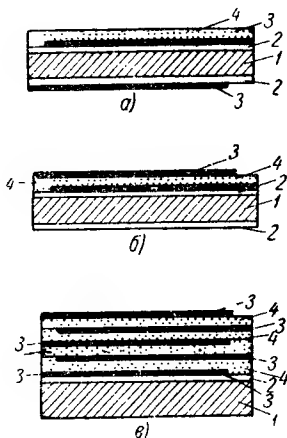


Рис. 100. Варианты конструкции лакопленочных конденсаторов с сохраненной (неэкранированной) подложкой: а — однослойный с зазором между диэлектриком и одной из обкладок; б — однослойный без зазора; в — многослойный конденсатор.

1 — бумага (подложка); 2 — защитный лак; 3 — слой металла; 4 — рабочий лак (диэлектрик).

объема, занимаемого подложкой в общем объеме конденсатора, а следовательно, увеличивается удельная емкость.

Во всех этих вариантах, в отличие от схемы рис. 99, подложка не экранирована и находится под действием электрического поля. Поэтому, если рабочим диэлектриком служит неполярная пленка с малым углом потерь, то общий угол потерь конденсатора будет ухудшаться за счет повышенных потерь в подложке.

Следует отметить, что многослойный конденсатор по схеме рис. 100, в трудно изготовить с одним и тем же типом лаковой пленки во всех слоях, так как при нанесении последующего слоя растворитель может разрушать предыдущий. По-видимому, в данном случае целесообразно чередовать слои разных лаков, полярных и неполярных, получая конденсатор с некоторыми промежуточными значениями электрических свойств.

Для ацетатных конденсаторов со снятой подложкой приводятся следующие данные: номинальное напряжение 50 в (пост. ток), номинальная емкость до 1—2 мкф, удельный объем в 4—7 раз меньше, чем у металло-бумажных конденсаторов; тангенс угла потерь при частоте 10 кГц не более 0,040. Зависимость постоянной времени, измеренной при комнатной температуре, от времени старения конденсаторов при двойном номинальном напряжении (100 в) и при повышенной температуре (50°С) показана в табл. 25. По сообщению авторов разработки, они считают эти результаты вполне эквивалентными тем, которые получаются при испытании американских металло-бумажных конденсаторов с диэлектриком 7,5 мк при напряжении 250 в. Они полагают, что при работе данного типа тонкослойного конденсатора при номинальном напряжении случайные пробои не должны иметь места.

Таблица 25

Изменение постоянной времени в процессе старения
лакопленочных конденсаторов со снятой подложкой

Время работы при напряжении 100 в и температуре 100°С, часы	Постоянная вре- мени, <i>ом·ф</i> , при 25°С	Время работы при напряжении 100 в и темпера- туре 100°С, часы	Постоянная вре- мени, <i>ом·ф</i> , при 25°С
0	1800	1200	1020
400	1420	2000	930
800	1200		

Конденсаторы аналогичного типа, но не из ацетатной, а из поликарбонатной пленки с толщиной диэлектрика 3 мк, разработаны также в Венгерской Народной Республике.

По данным Джонса, конденсаторы с весьма тонкой поликарбонатной пленкой разработаны и в Англии, очевидно, также на принципе лакопленочного конденсатора со снятой подложкой. При габаритных размерах: длина 12 мм и диаметр 7 мм получены по-

минальные емкости: 0,25 мкф при толщине пленки 3,2 мк и 1 мкф при толщине пленки 1,7 мк; это дает значения удельного объема порядка 0,5 см³/мкф при толщине 1,7 мк и порядка 2 см³/мкф при 3,2 мк. Номинальное рабочее напряжение указано равным 20 в (очевидно, при толщине 1,7 мк; это соответствует напряженности поля порядка 12 кв/мм); тангенс угла потерь 0,003; максимальная рабочая температура 140°С.

По данным Мак Лина, Уихи и Данте, опытные конденсаторы аналогичного типа изготавливались в США из американской поликарбонатной смолы лексен (фирма «Дженерал Электрик»), растворимой в дихлорметане.

Пленка толщиной 2,5 мк отливалась на подложку из майлара, с которой снималась после металлизации алюминием. Герметизированный конденсатор из такой пленки, емкостью 1 мкф, имел длину 27 мм и диаметр 7,5 мм, что дает удельный объем порядка 1,2 см³/мкф. По удельному объему эти конденсаторы соответствуют описанным выше конденсаторам из ацетатной пленки и при равном объеме позволяют получить в 4 раза выше емкость, чем однослойные конденсаторы из металлизированного майлара толщиной 6 мк.

Постоянная времени тонкослойных поликарбонатных конденсаторов при 20°С оказалась выше 200 000 ом·ф (в 10 раз выше, чем для ацетатной пленки и в 2 раза выше, чем для металлизированного майлара); при 50°С было получено 80 000 ом·ф, но при 100°С постоянная времени резко снизилась и составила только 125 ом·ф; возможно, что это связано с недостаточной доработанностью исходного продукта — лексена.

Для полистирольных конденсаторов с сохраненной подложкой приводятся следующие данные: номинальное напряжение 50 в (пост. ток), номинальная емкость до 0,035 мкф, удельный объем в 20 раз меньше, чем у слюдяных конденсаторов (при указанной емкости объем конденсатора менее 0,5 см³); пределы рабочей температуры от —55 до +75°С.

Конденсаторы перед испытаниями проходили следующий режим треппировки: разряд конденсатора емкостью 30 мкф через испытуемый конденсатор при низком напряжении и воздействие напряжения 100 в (двойное номинальное) в течение 10 сек (для устранения слабых мест), а далее 10 температурных циклов с воздействием крайних значений рабочей температуры (для стабилизации емкости). Изменение емкости после этих 10 циклов — менее ±0,5%, величина ТКЕ менее $-100 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹; постоянная времени выше 1000 Мом·мкф. Тангенс угла потерь мало изменяется с ростом частоты до 1000 кГц; далее он увеличивается при возрастании частоты, но при частоте 1 МГц еще имеет удовлетворительное значение, ниже $15 \cdot 10^{-4}$.

Длительные испытания конденсаторов при двойном рабочем напряжении и температурах —55, +25, +65 и +95°С показали, что при —55°С в течение всего времени испытания в 4000 ч конденсаторы вели себя очень стабильно; при 25°С наблюдалось мед-

ленное возрастание емкости, примерно на 0,7% за каждые 1000 ч; при 65°С емкость практически стабилизировалась за 200 ч, а далее на протяжении 4000 ч изменилась менее чем на 0,2%; при 95°С наблюдалось ухудшение угла потерь.

Если не считать приведенных данных о разработке тонкопленочных поликарбонатных конденсаторов в Венгрии и в Англии, то можно отметить, что американский опыт изготовления конденсаторов лакопленочного типа относительно медленно прививается в Европе. Проблема создания тонкопленочного конденсатора в таких европейских странах, как ФРГ и Италия, а также Англия, решается сейчас, в основном, по линии разработки и производства металло-лаковых конденсаторов.

§ 24. Металло-лаковые конденсаторы

Идея использования в конденсаторостроении лакированной фольги, т. е. тонкого слоя диэлектрика, нанесенного лаковым (а теперь также и суспензионным) способом на тонкую металлическую подложку, не является новой.

Так, еще в 1933 г. Д. А. Федоров предложил изготавливать конденсаторы низкого напряжения путем нанесения тонких слоев пленки ацетилцеллюлозного лака на алюминиевую фольгу. Пленки, полученные из этого лака на фольге, при толщине 10—30 мк имели следующие характеристики: $\rho_{\text{в}} = 10^{14} \div 10^{15} \text{ ом} \cdot \text{см}$; $\epsilon = 4 \div 6$; $\text{tg} \delta = 120 \div 180 \cdot 10^{-4}$; $E_{\text{пр}} = 20 \div \div 50 \text{ кв/мм}$.

Попытка практически применить это предложение для изготовления конденсаторов телефонного типа, взамен бумажных парафинированных, была сделана на заводе «Красная заря». Для проведения опытов была создана специальная установка, схема которой показана на рис. 101. Перед лакировкой фольга дважды промывалась спиртом. Для получения слоя лака толщиной 14 мк (на одну сторону) лакировка фольги произ-

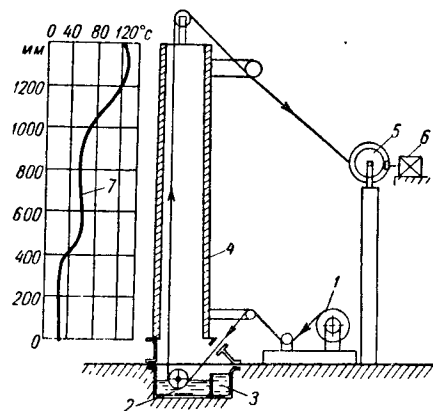


Рис. 101. Схема установки для лакирования алюминиевой фольги ацетилцеллюлозным лаком.

1 — рулон с фольгой; 2 — ванна с лаком; 3 — растворитель; 4 — печь; 5 — рулон с лакированной фольгой; 6 — привод; 7 — кривая распределения температуры по высоте печи.

водилась трижды: скорость движения фольги изменялась от 0,7 м/мин при первом проходе до 0,4 м/мин при последнем. Опытные конденсаторы изготавливались из ленты лакированной фольги шириной 40 мм и ленты нелакированной фольги шириной 30 мм, причем удавалось получить емкость до 0,5 мкф при значении удельной емкости, рассчитанной на единицу площади обкладок, равной 215—225 нф/см². Бумажные телефонные конденсаторы того времени имели удельную емкость порядка 140—155 нф/см², т. е. несколько меньше, чем конденсаторы из лакированной фольги, но их электрическая прочность была выше. Однослойные конденсаторы лакового типа (рис. 102, а) не могли быть рекомендованы для рабочего напряжения 200—250 в, которое требовалось от телефонного конденса-

тора. Электрическую прочность можно было повысить, наматывая конденсатор из двух лакированных лент фольги (рис. 102, б), но при этом толщина диэлектрика увеличивалась вдвое, удельная емкость резко падала и оказывалась ниже, чем в случае парафинированной бумаги. В связи с этим в тот период времени использование металло-лаковых конденсаторов оказалось нецелесообразным по технико-экономическим причинам.

Основным дефектом, присущим металло-лаковым конденсаторам, выявившимся уже на этом первом этапе, являлась трудность исключения слабых мест в лаковом слое, даже при двух- трехкратной лакировке. Это приводило к снижению электрической

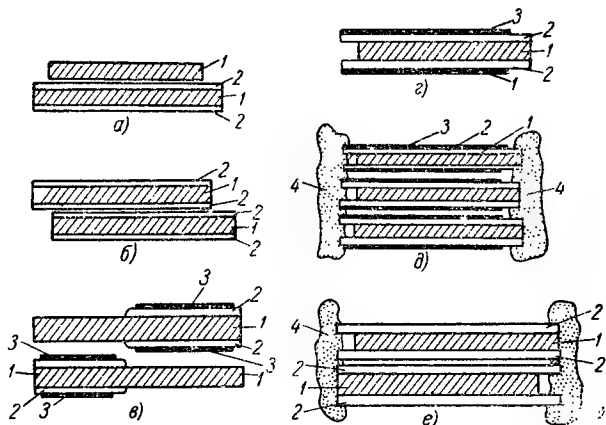


Рис. 102. Варианты конструкции металло-лаковых (лакофольговых) конденсаторов: а — лакированная и нелакированная фольга; б — две лакированные фольги; в — две фольги, лакированные на половину ширины с металлизацией поверх слоя лака; г — двусторонне-лакированная фольга с металлизацией лака; с левой стороны край фольги вытравлен; д — контактирование торцов конденсатора по варианту г; е — две фольги с двусторонней лакировкой и вытравленным краем: 1 — алюминиевая фольга; 2 — слой лака; 3 — тонкий слой металла, нанесенный испарением в вакууме; 4 — слой металла, нанесенный распылением на торцы секции.

прочности слоя при относительно большой его толщине. Таким образом, даже на малые для того времени напряжения порядка 200—250 в трудно было создать приемлемый конденсатор такого типа.

В настоящее время положение изменилось в связи с тем, что для аппаратуры с полупроводниковыми приборами требуются конденсаторы с рабочим напряжением, не превышающим нескольких десятков вольт. Это облегчает задачу создания металло-лакового конденсатора при значительно меньших толщинах лакового слоя, чем упоминавшиеся выше. Кроме того, появилась возможность изолирования слабых мест лакового слоя, а именно применение второго электрода в виде тонкого слоя металла, нанесенного испарением в вакууме.

Такой вариант лакофольгового конденсатора был освоен в ФРГ под обозначением ML (металло-лаковый), в отличие от обозначения MP, присвоенного металло-бумажным конденсаторам. При разработке такого конденсатора важной проблемой оказалась система подвода тока к металлизированной обкладке (подвод тока к фольговой обкладке конденсатора мог быть решен с помощью обычной контактной полоски из луженой фольги).

Было предложено решение,¹ представляющее достаточно сложным (рис. 102, в); металлическая фольга покрывается лаком только на половине своей ширины, вдоль всей длины ленты, с

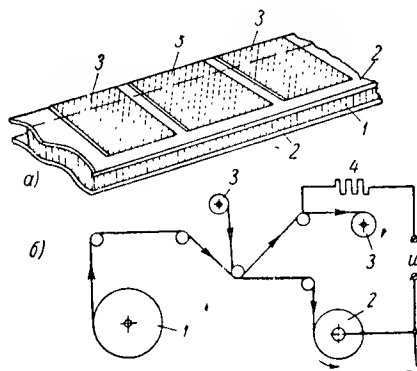


Рис. 103. Устранение слабых мест в лаковой пленке по патенту Хейвандта и Зейдса:

а — схема конденсатора с металлизированным слоем, разбитым на участки. 1 — фольга; 2 — лак; 3 — тонкий слой металла;

б — схема установки для «выжигания» слабых мест пленки: 1 — рулон лакированной и металлизированной фольги до выжигания; 2 — то же, после выжигания; 3 — металлизированная изоляционная пленка, подводящая отрицательный потенциал; 4 — защитное сопротивление.

эффект самовосстановления при пробое, так как тонкий металлический слой прилагает к толстой фольге и пробитое место не будет изолироваться от обкладок, как в обычных металлизированных конденсаторах. В этом случае преимуществом металлизированного слоя, оправдывающим его применение в данном случае, остается возможность устранения дефектов лакового слоя до намотки секций. Такое предложение сделано, в частности, в другом патенте ФРГ;² рекомендуется пропускать металлизированную лакированную фольгу перед намоткой конденсаторов через выжигающее устройство, в котором положительный потенциал подается на основную фольгу, а отрицательный потенциал проводится к металлизированному слою с помощью движущейся металлизированной изоляционной ленты; при этом слои металла на лакированной фольге рекомендуется разбивать на ряд изолированных участков с помощью изолирующих дорожек, расположенных перпендикулярно длине фольги; этим ограничивается энергия, подводимая к месту пробоя при «выжигании» слабого места (рис. 103).

¹ Патент ФРГ, кл. 21g, 10/02 (H010), № 1016840, 20.03.1958, К. Гюнтер.

² Патент ФРГ, кл. 21g, 10/02 (H010), № 1028886, 1.08.1957, Г. Зейдс, Г. Хейвандт.

Практически в ФРГ нашел себе место другой способ контактирования для металло-лаковых конденсаторов. С одной стороны лакированной ленты производится стравливание алюминия, как показано на рис. 102, з; металлизированный слой наносится со сдвигом к противоположному краю ленты; при этом напыление металла на торцы намотанной секции позволяет с одного торца осуществить провод тока к фольге, а с другой — к тонкому металлизированному слою (рис. 102, д).

Вытравливание фольги производится на глубину 1—2 мм. Некоторые данные об этом процессе приводятся в английском патенте.¹ Травящий раствор должен растворять алюминий, не разрушая лаковой пленки; поэтому лучше брать кислые растворы, чем щелочные. При вытравливании фольги толщиной 6 мк (содержание железа в алюминии 0,3%), покрытой с двух сторон изолянтным лаком (по 3,5 мк), для того, чтобы стравить фольгу на 1 мм в растворе HF с концентрацией 1%, потребовалось 240 ч. Далее применялась промывка в четырех сменах дистиллированной воды (по 6 ч) и просушка. Для такого же вытравливания аналогичной фольги, но покрытой эпоксиэпоксисмолой, в растворе HCl с концентрацией 7% потребовалось 70 ч. Таким образом, протравливание краев лакированной фольги явилось достаточно длительной операцией. Отмечается, что травление ведется на лакированной фольге, намотанной в рулоны, с натяжением 0,05—0,1 кг на 1 пог. см ширины фольги.

Значительное ускорение процесса вытравливания краев фольги и одновременно получение более ровной ширины вытравленной полосы удалось получить с переходом на метод электрохимического травления,² при котором на фольгу подается положительный потенциал, а в качестве травящей среды используется раствор лимоннокислого натрия и алюминия с добавкой веществ, улучшающих смачиваемость фольги электролитом. Лучший эффект в отношении ускорения процесса травления был получен при замене лимоннокислых электролитов растворами, содержащими ионы галогенов.

В ФРГ для лакировки фольги используется лак под названием «десмофен десмодур». Фольга, изолированная таким лаком, выпускается в готовом виде для конденсаторостроительных предприятий химической фирмой «Байер». Гёнинген сообщил, что этот лак изготавливается на основе полнуретановой смолы; толщина лаковой пленки 1,5—3 мк; $\epsilon = 3,9$ при 1 кГц (сухая пленка), при влажности 80% возрастает до 4,1; $TK\epsilon = +450 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$; при 1 кГц в сухом виде $\text{tg} \delta = 0,007$, при увлажнении $\text{tg} \delta = 0,011$; $\rho_v = 10^{16} \text{ ом} \cdot \text{см}$ в сухом состоянии, $10^{16} \text{ ом} \cdot \text{см}$ при влажности 50% и $10^{15} \text{ ом} \cdot \text{см}$ при влажности 80%; пробивная напряженность 200 кВ/мм при толщине 3 мк.

Выпуская в продажу новый тип конденсаторов ML, фирма «Бош» сообщила, что по интервалу допускаемых температур они изготавливаются двух классов: I — от -40 до $+85^\circ\text{C}$ и II — от

¹ Англ. патент, кл. 37, 100(2), 1811166, 2.04.1959, Шен Цзу-энь.

² Англ. патент, кл. 37, 41, № 835091, 18.05.1960, Герлинг, Гильберт и Саймонс.

—25 до +70°С. По номинальному напряжению также различается два вида конденсаторов ML (табл. 26).

Таблица 26

Металло-лаковые конденсаторы типа ML (ФРГ)

Номинальное напряжение, в		Пиковое напряжение, в	Емкость, мкф
постоянный ток	50 гц		
120	30	160	2—12
80	20	120	15—200

При пиковом напряжении конденсатор может работать 2000 ч при 20°С и до 200 ч при 70°С. При работе в цепи пульсирующего напряжения допускается переменная составляющая (в процентах от номинального напряжения) не свыше следующих значений: 20% при 50 гц, 15% при 120 гц, 9% при 300 гц, 5% при 1000 гц, 2% при 5000 гц и 1% при 10 000 гц. Испытательное напряжение между обкладками равно пиковому (пост. ток); между обкладками и корпусом испытание проводится напряжением 1000 в (50 гц, 2 сек). Допускаемое отклонение емкости от номинала: от —10 до +20%. Изменение емкости после действия термических циклов — не более $\pm 1\%$. Постоянная времени при заряде напряжением 100 в должна быть не ниже 200 Мом·мкф; $\text{tg} \delta$ — не выше 0,015.

При $U_{\text{ном}} = 120$ в конденсаторы изготавливаются в трубчатых корпусах с торцевыми проволочными выводами; при $U_{\text{ном}} = 80$ в — в цилиндрических корпусах с двумя выводными лепестками на изоляционной крышке, с одного торца. Объем конденсаторов типа ML в 3 раза меньше объема металлобумажных типа МР. При наибольших значениях $C_{\text{ном}}$ удельный объем равен 1,6—1,8 см³/мкф.

По данным Делла Джованни аналогичные конденсаторы выпускаются в Италии под названием «металак». Зависимость электрических характеристик этих конденсаторов от температуры показана на рис. 104, а-в. По величине $\text{tg} \delta$ они похожи на конденсаторы, выпускаемые в ФРГ, но ТКЕ у них выше, а постоянная времени улучшена. Верхний предел рабочей температуры указан равным 70°С. Отмечается, что при ускоренном испытании на срок службы при напряжении, равном 1,5 $U_{\text{ном}}$, и при 85°С наблюдалось повышение угла потерь на 10%, снижение емкости на 5% и уменьшение постоянной времени на 60%. Однако постоянная времени после такого старения, измеренная при 20°С, еще составляла около 4500 Мом·мкф. Делается вывод, что в нормальных рабочих условиях такие конденсаторы должны успешно работать не меньше 20 лет. Отмечается, что по удельному объему они в 6 раз меньше, чем обычные бумажные, и на 1/3 меньше, чем, металло-бумажные. Толщина фольги указана равной 5 мк.

Обращает на себя внимание, что сокращение объема в сравнении с металло-бумажными конденсаторами указано значительно меньшим, чем в случае конденсаторов в ФРГ. Ознакомление с образцами таких конденсаторов итальянской фирмы «Икар» показало, что в них не применена металлизация лака и конденсатор изготавливается намоткой из двух лакированных лент, как показано на рис. 102, е. При этом между обкладками из фольги поме-

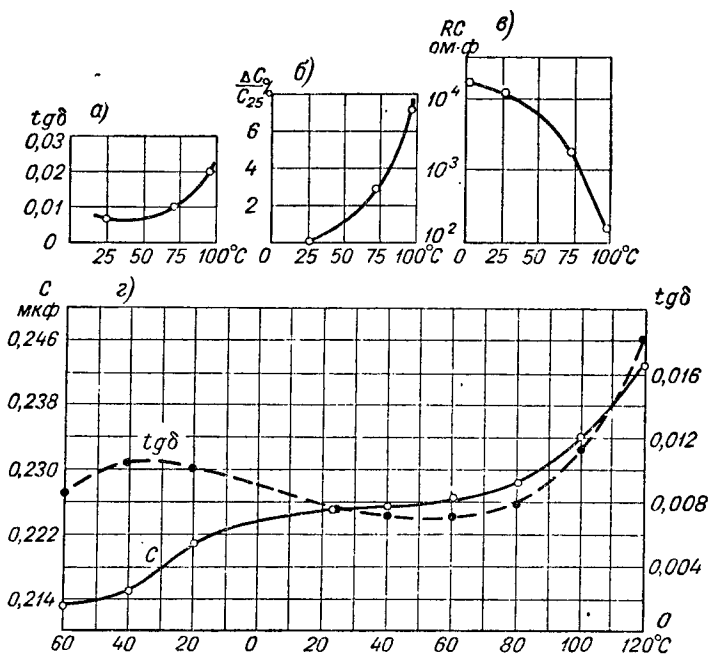


Рис. 104. Электрические свойства итальянских металло-лаковых конденсаторов в зависимости от температуры: а, б, в — по данным Делла Джованна; г — результаты испытания конденсатора фирмы «Икар» (емкость и угол потерь измерялись при частоте 1 кГц).

щен двойной слой лака, т. е. диэлектрик в 2 раза толще, чем в конденсаторах ФРГ, поскольку применяется та же лакированная фольга, поставляемая фирмой «Байер». Этим объясняется, с одной стороны, увеличенный удельный объем этих конденсаторов, а с другой стороны, их улучшенная постоянная времени.

Фирма «Икар» выпускает металло-лаковые конденсаторы под маркой серия «синтекс» в виде цилиндрических конденсаторов, опрессованных пластмассой типа «поликсит», а также в овальных алюминиевых корпусах с крышкой из такой же пластмассы, закрепленной закаткой краев корпуса (рис. 105). Конденсаторы рассчитаны на рабочее напряжение 75 в и пиковое 100 в. Испытательное напряжение 125 в (постоянный ток, 1 сек). Пределы номинальной емкости: от 0,02 до 4 мкф при опрессовке пластмассой и

от 5 до 10 мкф — в алюминиевых корпусах. Допускаемое отклонение емкости от номинала $\pm 20\%$; $\operatorname{tg} \delta$ — не более 0,01 (25°C , 1 кГц); при емкостях, равных или выше 0,33 мкф, постоянная времени при 25°C не ниже 2000 Мом·мкф; при емкостях ниже 0,33 мкф сопротивление изоляции не ниже 6000 Мом. Интервал рабочих температур: от -55 до $+100^\circ\text{C}$; максимальное значение допускаемой влажности воздуха 95%. Зависимость угла потерь таких конденсаторов и их емкости от температуры, при частоте 1 кГц, приведена на рис. 104, г. Удельный объем таких конденсаторов при наибольших значениях номинальной емкости составляет 2,5—5 см³/мкф.

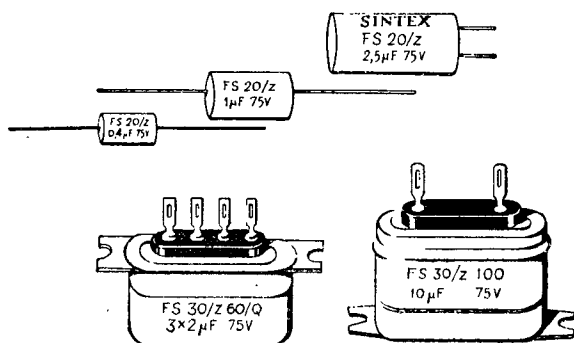


Рис. 105. Металлолаковые конденсаторы серии синтекс фирмы «Икар».

Фирма «Икар» мотивирует отказ от металлизации тем, что применение металло-лаковых конденсаторов в схемах с полупроводниковыми приборами, где напряжение мало, не позволяет рассчитывать на проявление свойства самовосстановления ввиду недостаточного выделения энергии в месте пробоя при коротком замыкании обкладок; таким образом, основное преимущество металлизации отпадает, а остаются ее недостатки: ухудшенная и нестабильная постоянная времени и уменьшенный верхний предел рабочей температуры.

Однако надо все же иметь в виду, что отказ от металлизации связан со значительным возрастанием удельного объема конденсаторов. Следует также учитывать, что даже если в условиях работы самовосстановление не будет иметь места, то это явление все же можно использовать для улучшения электрической прочности конденсатора путем «выжигания» слабых мест лакового слоя еще до намотки или при тренировке уже намотанных конденсаторов повышенным напряжением.

Недавно выпуск металло-лаковых конденсаторов начат в Англии под названием тип «стантелак». Конденсаторы собираются в трубчатых латунных луженых корпусах и рассчитаны на работу в диапазоне температур от -40 до $+70^\circ\text{C}$. Их можно отнести к категории H1 40/70 британского стандарта BS 2131. Номи-

нальные данные и размеры конденсаторов указаны в табл. 27, а данные об их электрических свойствах — в табл. 28. Допускаемое отклонение емкости от номинала составляет 20%, пиковое напряжение равно двойному номинальному. По удельному объему и постоянной времени эти конденсаторы подходят к итальянским, а потому можно думать, что или они также изготовлены без применения металлизации, т. е. с двумя слоями лака между обкладками, или же, если металлизация в них использована и применен лишь один слой лака, то его толщина выше, чем в конденсаторах типа ML. Тип диэлектрика, использованный в конденсаторах стантелак, неизвестен; возможно, что это тот же полиуретановый лак, что и в описанных выше конденсаторах.

Таблица 27

Английские металло-лаковые конденсаторы типа стантелак

Номинальное напряжение, при 70° С	Номинальная емкость, мкф	Размеры корпуса, мм		Объем, см³	Удельный объем см³/мкф
		диаметр	длина		
50	0,01	4,83	14,7	0,27	27,0
50	2,2	13,72	43,43	6,1	2,8
100	0,01	4,83	19,81	0,36	36,0
100	1,0	13,72	43,43	6,1	6,1

Таблица 28

Зависимость электрических свойств конденсаторов стантелак от температуры

Температура, ° С	Постоянная времени, Мом·мкф	Тангенс угла потерь		Изменение емкости, %
		50 гц	900 гц	
—40	17 000	0,0088	0,0101	—4,2
20	18 000	0,0070	0,0081	—
70	6 500	0,0075	0,0081	+2,8
Норма при 20° С	Не ниже 5000 (или 25 000 Мом)	—	Не выше 0,010	—

По сообщению Герлинга и Смита на Международной Конференции по радиоматериалам и деталям 1961 г. (Лондон), в Англии закончена разработка нового типа металло-лакового конденсатора с диэлектриком из полиизоцианата, ¹ наносимого на металлическую фольгу лаковым способом с обеих сторон. Вторым электродом служит металлический слой, нанесенный испарением металла в вакууме на одну из лакированных сторон. Край фольги вытравливается, как уже описывалось выше. Толщина слоя диэлектрика: 3 и 1,5 мк; удельный объем конденсаторов, полностью герметизированных, со стеклянными изоляторами, при 3 мк составляет 2,2 см³/мкф и при 1,5 мк — 1,02 см³/мкф. При испытании

¹ Соединение, близкое к полиуретану.

конденсаторов получены следующие значения электрических характеристик: $\text{TKE} = +600 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, коэффициент мощности при 50 и 900 гц — менее 0,01, постоянная времени — более 5000 Мом·мкф, активное последовательное сопротивление, эквивалентное потерям, при 1 мкф и 1 Мгц — менее 0,075 ом. Испытания на длительную работу и хранение производились в течение 20 000 ч при напряжениях 0, 24, 50, 100 и 150 в и температурах 50, 70 и 80°С. Катастрофического числа пробоев ни при одном из этих режимов не наблюдалось. Изменения емкости и угла потерь в большинстве случаев были пренебрежимо малы. При хранении без напряжения при 50 и 70°С постоянная времени оставалась высокой, но при 80°С наблюдались выпадения до 10 Мом·мкф. При напряжении 150 в постоянная времени практически не менялась, но при 50—100 в наблюдалось ухудшение средних значений. При замене цинкового покрытия алюминиевым — поведение конденсаторов при длительной работе и хранении заметно улучшилось, в связи с чем в дальнейшем была принята металлизация алюмином в обязательном порядке. Установлены номинальные напряжения: 50 в для толщины 3 мк (16,6 кв/мм) и 100 в для толщины 5 мк (20 кв/мм). Повышение рабочей напряженности возможно, если в условиях эксплуатации можно допускать систематические пробои и самовосстановление конденсаторов.

§ 25. Металло-политетрафторэтиленовые конденсаторы

Описанные выше типы металло-лаковых конденсаторов дают возможность обеспечить верхний предел рабочей температуры не выше 100°С. Дальнейшее повышение рабочей температуры этих миниатюрных конденсаторов можно было бы получить, применяя в качестве диэлектрика такой нагревостойкий материал, как политетрафторэтилен (ПТФЭ).

Однако ПТФЭ нерастворим в обычных растворителях, а кроме того, его весьма трудно металлизировать; это не позволяет воспроизвести ту технологию и конструкцию, которая была разработана для конденсаторов типа ML; при использовании такого диэлектрика нужна измененная технология.

Вместо лака может быть использована суспензия ПТФЭ, наносимая на фольгу с последующей термообработкой для спекания частиц материала в однородную пленку. Этот принцип, как указывалось в § 7, применяется для получения пленок ПТФЭ с повышенной электрической прочностью, которые снимаются с металлической подложки после спекания. Если взять подложку в виде тонкой металлической фольги и оставить на ней тонкую пленку ПТФЭ, не снимая ее после завершения спекания, то мы получим конденсатор, схожий с металло-лаковым; такой конденсатор можно назвать металло-суспензионным или металло-политетрафторэтиленовым.

В США пленки этого типа называют армированными. Алюминиевая фольга покрывается пленкой ПТФЭ с обеих сторон при

толщине слоя на одну сторону от 1,5 до 12,5 мк. При определении электрической прочности подобных пленок (испытание в 4 слоя по схеме рис. 106) получены следующие значения (пост. ток): $4 \times 1,5$ мк — 300 кВ/мм, 4×3 мк — 390 кВ/мм, 4×6 мк — 310 кВ/мм, 4×10 мк — 350 кВ/мм и $4 \times 12,5$ мк — 350 кВ/мм. При изготовлении из таких пленок конденсаторов емкостью от 0,001 до 1 мкФ, намотываемых из двух лент изолированной ПТФЭ фольги (по схеме рис. 102, е), т. е. при двойной толщине диэлектрика между обкладками, использовались следующие значения рабочего напряжения и напряженности поля: при толщине $2 \times 1,5$ мк — 100 в, или 33 кВ/мм, и при толщине 2×3 мк — 500 в, или 83,5 кВ/мм. При толщине пленки 1,5 мк можно получать удельный объем до $1,5 \text{ см}^3/\text{мкФ}$. Для таких конденсаторов $\text{tg} \delta \approx 2 - 3 \cdot 10^{-4}$ и верхний предел рабочей температуры до $200 - 250^\circ \text{C}$.

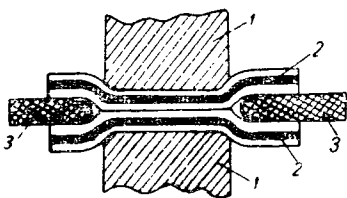


Рис. 106. Схема испытания на пробой алюминиевой фольги с двусторонним покрытием тефлоном.

1 — электролит; 2 — фольга, покрытая тефлоном; 3 — изоляция, защищающая от перекрытия.

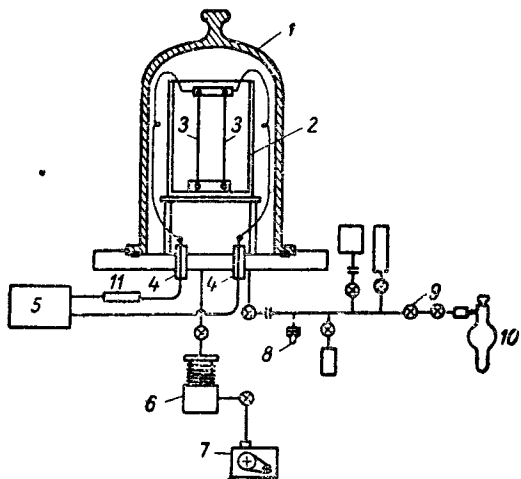


Рис. 107. Схема установки для нанесения тонкого слоя политетрафторэтилена методом полимеризации в тлеющем разряде.

1 — вакуумный колокол; 2 — цилиндрический сосуд; 3 — рамки с подложками; 4 — тефлоновые изоляторы для ввода переменного напряжения; 5 — источник переменного напряжения для создания разряда; 6 — диффузионный насос; 7 — ротационный форвакуумный насос; 8 — впуск воздуха или газа; 9 — игольчатый клапан; 10 — стеклянный сосуд с газообразным мономером; 11 — ограничительное сопротивление: 10 ком, 10 вт.

из тефлона вводилось переменное напряжение от источника с максимальным напряжением 800 в и максимальным током 800 ма (частота 60 гц). Это напряжение создавало тлеющий разряд ме-

жду электродами, помещенными внутри цилиндрического сосуда. В стеклянной колбе собирались газообразные фторированные продукты разложения тефлонового порошка, которое осуществлялось методом пиролиза. Эти газообразные продукты (мономер) подавались далее под колокол, где в условиях глущего разряда происходила полимеризация, причем образующийся полимер тонким слоем осаждался на подложке.

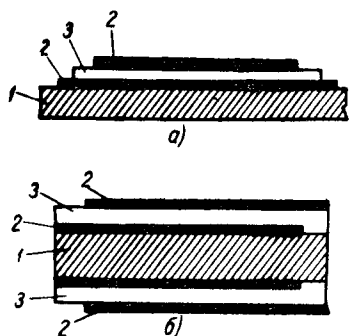


Рис. 108. Схемы опытных конденсаторов: а — одностороннее покрытие (подложка не экранирована); б — двухстороннее покрытие (подложка заэкранирована).

1 — майлар; 2 — алюминий; 3 — тефлон.

В качестве подложки использовались ленты майлара длиной 300 мм и толщиной 6,5 мк, покрытые слоем алюминия, служившим первой обкладкой опытного конденсатора; второй обкладкой служил слой алюминия, также нанесенный испарением в вакууме поверх тонкой пленки ПТФЭ, осажденной на подложку. Схема устройства такого опытного конденсатора показана на рис. 108, а; были испытаны также конденсаторы с двухсторонним покрытием пленок ПТФЭ по схеме рис. 108, б, в которых майлар заэкранирован и не попадает в электрическое поле, что даст улучшение

электрических свойств конденсаторов.

Емкость опытных конденсаторов лежала в пределах 0,04—0,08 мкф. Толщина пленок ПТФЭ варьировалась в процессе исследования в пределах от 0,75 до 2 мк. Опытные конденсаторы успешно выдержали длительное испытание при напряжении 45 в и температуре 85°С (порядка 3000 ч).

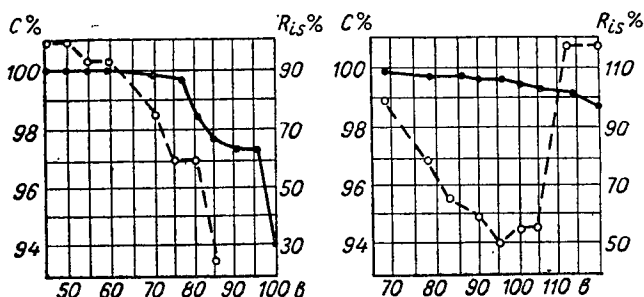


Рис. 109. Зависимость емкости и сопротивления изоляции от напряжения для двух опытных конденсаторов с толщиной пленки 1,25 мк.

Изменение емкости и сопротивления изоляции двух опытных конденсаторов, в зависимости от напряжения, при ступенчатом увеличении последнего, с выдержкой на каждой ступени по не-

сколько минут, показана на рис. 109. До 70—75 в изменения электрических свойств оказались незначительными. Эти данные соответствуют толщине пленки 1,25 мк. Таким образом, изменения электрических свойств в данном случае наблюдались при напряженности поля выше 55—60 кВ/мм.

Часть образцов была подвергнута испытанию на работу при 125°С и напряжении 73 в (пост. ток). После 400 ч работы 4 образца имели постоянную времени выше 400 ом·ф, один имел 170 ом·ф и один 50 ом·ф.

Авторы полагают, что, используя подложку уменьшенной толщины и многослойную конструкцию (подобную лакопленочному конденсатору по схеме рис. 100, в) при толщине пленки 1 мк, можно будет получать удельную емкость до 200 мкф на 1 куб. дюйм, что соответствует значению 12,2 мкф на 1 см³.

Тангенс угла потерь опытных конденсаторов составлял 0,003—0,007; при улучшении надежности контакта авторы предполагают снизить это значение до 0,0015—0,003.

По-видимому, этот интересный метод изготовления тонкопленочных конденсаторов еще не доведен до стадии производства конденсаторов даже в мелкосерийном масштабе. Можно полагать, что при такой методике работы тонкий слой диэлектрика, осаждающийся на подложке при полимеризации газовой смеси в тлеющем разряде, необязательно представляет собой чистый политетрафторэтилен, а может быть более сложным продуктом совместной полимеризации ряда фторорганических соединений. Возможно, что это обстоятельство заставило авторов ожидать относительно больших значений $\tan \delta$ (выше 0,0015) даже при условии улучшения контактного узла, а также обусловило их осторожный подход к выбору рабочей температуры при испытании образцов.

•

ЛИТЕРАТУРА

А. Общие сведения по химии полимеров и по свойствам синтетических пленок

1. П. П. Кобеко, Аморфные вещества, изд. АН СССР, 1952, библиографическое название 205 назв.
2. Э. И. Барг, Технология синтетических пластических масс, Госхимиздат, 1954, библиографическое название 232 назв.
3. В. И. Калитвянский, Общие закономерности теплового старения полимерных диэлектриков, «Электричество», 1955, № 3.
4. М. М. Михайлов, Лю Цзы-юй, Исследование короностойкости некоторых диэлектриков, Журн. техн. физики, 1957, XXXVII, № 5.
5. С. Уайтхед, Пробой твердых диэлектриков (перев. с англ.), ГЭИ, 1957.
6. К. А. Андрианов, Синтетические высокомолекулярные соединения как диэлектрики, «Электричество», 1958, № 4.
7. В. И. Калитвянский, Связь нагревостойкости диэлектриков с их химическим составом и структурой, Вопросы эл. изоляции, ГЭИ, 1958.
8. Е. С. Кронгауз, А. П. Супрун, Краткий обзор работ по изотактическим полимерам, «Успехи химии», 1958, XXVII, № 9.
9. Химия больших молекул, Сборник статей, изд. АН СССР, 1958.
10. Н. И. Воробьев, Новые виды диэлектриков, «Вестн. эл. промышл.», 1959, № 1.
11. А. Р. Хиппель, Диэлектрики и их применение (перев. с англ.), ГЭИ, 1959.
12. К. А. Водопьянов и др., Электрофизические свойства технических изолирующих материалов в условиях радиационного облучения, «Электричество», 1960, № 5.
13. Н. И. Воробьев, О взаимозависимости физических свойств полимеров, «Электричество», 1960, № 3.
14. Г. П. Михайлов, Б. И. Сажин, Высокомолекулярные диэлектрики, «Успехи химии», 1960, № 7, библиографическое название 46 назв.
15. М. А. Мельников, Исследование импульсного пробоя некоторых полимеров и слюды, «Физика диэлектриков. Труды 2-й Всесоюз. конф.», 1960—IX, АН СССР, 1960.
16. Н. А. Родионова, Влияние сорбционной формы связи воды на электрические свойства органических диэлектриков, там же.
17. Физика полимеров. Сборник статей под ред. М. В. Волькенштейна. Изд. «Иностран. лит.», 1960.
18. П. В. Александров и др., Определение короностойкости электроизоляционных материалов различными методами, «Электричество», 1961, № 4.
19. Т. Л. Бакуменко, Н. П. Федоренко, Е. П. Шукин, Об экономике производства полимеризационных пластиков, «Пластич. массы», 1961, № 9, 52.
20. Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, Б. М. Тареев, Электротехнические материалы, ГЭИ, 1961.
21. Б. И. Сажин, Зависимость электропроводности полимеров от температуры, «Пластич. массы», 1961, № 6.
22. Г. Штегер, Электроизоляционные материалы (перев. с нем.), ГЭИ, 1961.

23. T. Dakin, N. Philofski, W. Divens, Effect of electric discharges on the breakdown of solid insulation, *El. Engineering*, 1954, 13, № 9.

24. J. D. Hoffman, The mechanical and electrical properties of polymers — an elementary molecular approach, *IRE Trans. on Component Parts*, 1957, VCP—4, № 2.

25. L. W. Turner, Thin polymeric films for use as dielectrics, *The Journal of Brit. IRE*, 1961, 21, № 3.

*Б. Общие сведения по пленочным намотанным конденсаторам
и работы обзорного характера*

1. В. Т. Ренне, Диэлектрики и конденсаторы (реф.), «Электричество», 1937, № 17—18.

2. В. Т. Ренне, Конденсаторы с пленочным диэлектриком (реф.), «Электричество», 1947, № 2.

3. В. Т. Ренне, Электрические конденсаторы, ГЭИ, 1947.

4. В. Т. Ренне, Пленочные конденсаторы. Сборн. материалов по обмену опытом, БТИ, МПСС, 1948, № 1.

5. В. Т. Ренне, Электрические конденсаторы, Справочник «Электрическая изоляция», раздел XXIII, ГЭИ, 1948.

6. В. Т. Ренне, Электрические конденсаторы, ГЭИ, 1952.

7. В. Т. Ренне, Развитие отечественного конденсаторостроения, «Электричество», 1955, № 7, 114.

8. В. Т. Ренне, Советское конденсаторостроение, Сборник «Развитие электрической изоляции за 40 лет Советской власти», ГЭИ, 1957.

9. В. Т. Ренне, Пленочные конденсаторы, «Электричество», 1957, № 9.

10. В. Т. Ренне, Электрические конденсаторы, История энергетической техники СССР, том 2, гл. 10; ГЭИ, 1957.

11. В. Т. Ренне, Электрическая изоляция в конденсаторах, Справочник по электротехническим материалам, том I, часть 2, раздел 22, ГЭИ, 1959.

12. В. Т. Ренне, Электрические конденсаторы, ГЭИ, 1959.

13. В. Т. Ренне, М. М. Морозов, Итальянское конденсаторостроение, «Изв. высш. уч. завед., Электромеханика», 1960, № 9, 149—160.

14. P. R. Coursey, Electrical condensers, London, 1927.

15. G. Straimer, Der Kondensator in der Fernmeldetechnik, Leipzig, 1939.

16. L. Kahn, Dielectrics in capacitors (A.R. von Hippel, Dielectric materials and applications), N. Y.—London, 1954.

17. K. Henney, C. Walsh, Electric components hand book, N. Y., 1958

18. G. W. Dummer, Fixed capacitors, London, 1956.

19. J. H. Cozens, Development of plastic dielectric capacitors, *The Journal of Brit. IRE*, 1958, 18, № 2.

20. H. Gönning, Die Kunststoffe-Kondensatoren, ETZ, 1958, 10, № 11.

21. A. J. Warner, High quality components and dielectrics, *Proceed. 1958 Electronic Components symposium*, paper № 27, Pasadena, 1958.

22. J. H. Cozens, Developments of plastic dielectric capacitors, *IRE Trans. on Component Parts*, 1959, 6, № 2.

23. D. Zanobetti, Le norme per i componenti elettrici ed elettronici (particolamento quelle militari americane e britanniche), NRN (Note, recensione e notizie), 1959, VIII, № 5.

24. A. A. Tiezzi, Design trend in to morrow capacitors, *IRE Trans. Product. Technology*, 1959, № 5.

25. A. L. Lunchick, Paper and plastic capacitors, *Electronics*, 1960, 33, № 13.

26. G. W. Dummer, H. M. Nordenberg, Fixed and variable capacitors, N. Y., 1960.

*В. Неполарные полимеры и конденсаторы с диэлектриком
из неполарных синтетических пленок*

1. И. П. Богородицкий, В. Н. Малышев, Полистирол как электроизолирующий материал, Труды 3-й Всесоюзн. конф. по электрон. материалам, 1934.

2. Н. П. Богородицкий, В. Н. Малышев, Полистирол в технике высоких частот, «Изв. электропром. слаб. тока», 1937, № 11.
3. В. Т. Ренне, Полистирольные конденсаторы (реф.), «Электричество», 1947, № 6.
4. Конденсаторы из органической пленки, «Вестн. информации», 1949, № 23.
5. Конденсаторы из стироплекса, «Вестн. информации», 1951, № 21.
6. В. Т. Ренне, А. П. Бутра, Поведение полистирольных конденсаторов при воздействии переменного напряжения, «Журн. техн. физики», 1954, № 11.
7. Фторопласт, под ред. М. М. Гарбаря, Госхимиздат, 1954.
8. Г. П. Михайлов, С. П. Кабин, Б. И. Сажин, Исследование диэлектрических потерь полиэтилена, «Журн. техн. физики», 1955, XXV, № 4.
9. Ш. Т. Абзанидзе, Исследование свойств пленки фторопласта-4, «Н.-т. инф. бюлл. ЛПИ им. М. И. Калинина», 1957, № 11.
10. В. Т. Ренне, Тефлоновые конденсаторы, Сборник «Фторорганические электроизоляционные материалы» (под ред. Б. М. Тареева), ГЭИ, 1957.
11. Теплостойкие полимеры стирола, «Химия и технология полимеров», 1957, № 1.
12. И. Е. Балыгин, К. С. Порковский, О температурной зависимости электрической прочности фторопласта, «Журн. техн. физики», 1958, XXVIII, № 8А.
13. С. М. Брагин, Электрическая прочность полиэтилена при высокой частоте, «Изв. АН СССР, серия физ.», 1958, IV, том 22, № 4.
14. И. А. Луначарский, Новый синтетический полимер — полипропилен и его применение, «Химич. наука и промыш.», 1958, 3, № 3.
15. Б. И. Сажин, Исследование некоторых свойств полиэтилена, подвергнутого воздействию гамма-излучения, «Журн. техн. физики», 1958, XXVIII, № 9А.
16. С. Л. Эггеруол, О. Д. Свитинг, Полиэтилен: получение, структура и свойства (перев. с англ.), «Успехи химии», 1958, 27, № 9.
17. Н. А. Староскольский и др., Рудничные откатные бесконтактные электровозы повышенной частоты (приведены данные о батареях полистирольных конденсаторов), «Электричество», 1959, № 2.
18. В. А. Каргин и др., Электронномикроскопические исследования кристаллической структуры полистирола и полипропилена, «Высокомолекулярные соединения», 1960, 2, № 6.
19. Б. И. Сажин, Электрические свойства полиэтилена низкого давления, «Пластич. массы», 1960, № 1.
20. А. В. Топчиев и др. О некоторых термических свойствах полипропилена, «Пластич. массы», 1960, № 7.
21. Н. Ф. Усманова, А. В. Голубева, О синтезе и свойствах полимеров и сополимеров альфа- и бета-винилнафталина, «Пластич. массы», 1960, № 3.
22. Переработка листового полиэтилена и полипропилена в изделия методом вакуумного формования, «Химия и химич. технология», 1960, № 6.
23. Свойства полипропилена и переработка его литьем под давлением, «Химия и технология полимеров», 1960, № 12.
24. Е. Е. Барони, О повреждении полистирола ионизирующим излучением, «Высокомолекулярные соединения», 1961, 3, № 7.
25. H. Nottebrock, Neues über Widerständen, Kondensatoren und Spulen, Siemens-Zeitschrift, 1938, 18, № 7.
26. H. Nottebrock, Widerstände, Kondensatoren und sonstige Einzelteile, Verröffentl. aus d. Gebiete der Nachrichtentechnik, 1939, № 2.
27. H. Horn, Herstellung und Anwendung der elektrischen Isolierstoffe Styroflex, Kunststoffe, 1940, 30, № 3.
28. L. Linder, Neuzeitliche Kondensatoren der Nachrichtentechnik und ihre Entwicklung, ETZ, 1940, 61, № 42—43.
29. A. Austen, The dielectric properties of some homogenous materials of high electric stress, JIEE, 1945, X, p. I, № 58.
30. J. R. Weeks, Polystyrene capacitors, Bell Laboratory Rec., 1946, XXIV, № 3.
31. A. Hippel, L. Wesson, Polystyrene plastics as high frequency dielectrics, Ind. & Eng. Chemistry, 1946, 38, № 11.

32. Plasticon TS capacitors, *Proceed. IRE*, 1948, 36, № 10, 22 A.
33. J. H. Cozens, Plastic film capacitors, *Wireless World*, 1949, 55, № 6.
34. W. Katzshner, Ein Beitrag zum Schichtungsproblem elektrischer Isolierstoffe, *ETZ*, 1950, 71, № 11.
35. G. Geschka, F. Lange. Styroflex-Kondensatoren, *Electrotechnik*, 1951, 5, № 3.
36. L. Matheson, V. Caldecourt, Electrical charge storage in polystyrene capacitors, *J Appl. Physics*, 1951, 22, № 9.
37. H. F. Church, C. G. Garton, Some mechanisms of insulation failure, *The Proceed. of the IEE*, 1953, 100, p. 11A, № 3.
38. Metallized polystyrene capacitors, *Wireless World*, 1953, LIX, № 6.
39. P. Henniger, Entwicklungslinien auf dem Gebiete der elektrischen Bauelemente der Nachrichtentechnik, *Frequenz*, 1953, 7, № 12, 389; 1954, 8, № 1.
40. P. Erlich, Dielectric properties of teflon film from room temperature to 314° C and from frequencies 10² to 10⁶ hz, *J. of Research of NBS*, 1953, 51, № 4.
41. S. Madorsky, Thermal degradation of tetra fluoroethylene polymers in a vacuum, *J. of Research of the NBS*, 1953, 51, № 6.
42. C. B. Charlton, Polystyrene film as a capacitor dielectric, *TMC Technical Journal*, 1954, 5, № 1.
43. P. Harris, Plastic film capacitors, *Ericsson Review*, 1954, № 2.
44. R. Florin, Factors affecting the thermal stability of polytetrafluoroethylene, *J. of Research of the NBS*, 1954, 53, № 2.
45. G. Mistic, Plastics as capacitor dielectrics. Polystyrene, *Plastic Technology*, 1955, June.
46. J. Henry, Condensateurs au polystyrole, *Electronique Industrielle*, 1955, № 5.
47. S. Flaks, A. Pigeonnier, Les condensateurs au polystyrole, *L'Onde Electrique*, 1955, 35, № 336—337.
48. D. Zanobetti, Condensatori al polistirolo, Milan, 1955.
49. Adjustable polystyrene capacitors, *Electronics*, 1955, 28, № 1.
50. Capacitors with adjustable values, *Electronics*, 1955, 28, № 2.
51. G. Mistic, Plastics as capacitor dielectrics. Teflon, *Plastic Technology*, 1955, August.
52. R. C. Doban, C. A. Sperati, B. W. Sandt, The physical properties of Teflon (polytetrafluoroethylene), *SPE Journal*, 1955, № 9.
53. G. Mistic, Plastics as capacitor dielectrics. Polyethylene, *Plastic Technology*, 1955, May.
54. J. Ludányi, Műanyagdielektrikum Kondenzátorok, *Magyar tud. akad. Műsz. tud. oszt. Közé*, 1956, 29, № 1—2.
55. K. Sugito, S. Nagao, J. Torigama, The corona resisting property of polytetrafluoroethylene, *Brit. Journal of Appl. Physics*, 1956, 7, № 1.
56. G. A. Dummer, Hightemperature components, *Wireless World*, 1956, 62, № 10.
57. H. Waldbach, Entwicklungstendenzen im Mittelfrequenz-Kondensatorenbau, *Deutsche Elektrotechnik*, 1957, 11, № 8.
58. Styroflex-Luft Kondensatoren, *Elektromeister*, 1957, 10, № 2.
59. Papier- und Styroflex-Kondensatoren, *Elektromeister*, 1957, 10, № 2.
60. G. Fabre, Les matières plastiques dans l'électrotechnique: polystyrène — polyéthylène — fluoroéthène; *Electricité*, 1958, № 249.
61. Normal-Kondensatoren mit Kunststoffdielektrikum, *Feinwerktechnik*, 1958, 62, № 11.
62. Condensateurs au polystyrole, *L'Onde Electrique*, 1959, 39, № 383.
63. F. Mac Cabe, Polystyrene dielectric capacitors, *ATE Journal*, 1959, 15, № 3.
64. R. A. Weeks, D. Binder, Effects of neutron and gamma-ray irradiation on the dielectric constant and loss tangent of some plastic materials, *Power, Apparatus and System*, 1959, IV, № 41.
65. Corona resistance boosted 70-fold in new TFE (teflon) wire insulation, *Materials and Design Engineering*, 1960, IV, 51, № 3.
66. Polypropylene developments in Italy, *Modern Plastics*, 1960, 37, № 10.

67. D. Schleede, F. Schülde, Die Eigenschaften des Propylen, Der Plastverarbeiter, 1960, № 4.
68. Adjustable polystyrene capacitors, Electronic Engineering, 1961, 33, № 400.
69. Polystyrene, Modern Plastics, 1961, 38, № 5.
70. Polypropylene, Modern Plastics, 1961, 38, № 5.

*Г. Полярные полимеры и конденсаторы с диэлектриком
из полярных синтетических пленок*

1. И. М. Гольдман, Н. А. Сагалова, Высоковольтная изоляция из ацетилцеллюлозы, «Журн. техн. физики», 1932, 2, № 9—10.
2. М. М. Столяров, Электронизоляция из бензилцеллюлозы, «Вестн. электропромышлен.», 1937, № 1.
3. Д. А. Федоров, В. Н. Малышев, Диэлектрические потери ацетилцеллюлозы и влияние растворителей на их величину, «Журн. техн. физики», 1933, 3, № 5.
4. М. Свердлин, Определение термостабильности ацетилцеллюлозы, «Заводск. лаборатория», 1938, 7, № 4.
5. С. Н. Ушаков, Эфиры целлюлозы и пластические массы на их основе, Госхимиздат, 1941.
6. П. П. Кобеко, Г. П. Михайлов, З. И. Новикова, Диэлектрические потери в полярных полимерах, «Журн. техн. физики», 1944, 14, № 1—2.
7. П. В. Никулин, Диэлектрические свойства отечественной хлорвиниловой изоляции, «Вестн. электропромышлен.», 1944, № 7.
8. Получение, свойства и применение терефталата полиэтилена, «Химия и химич. технология», 1953, № 12.
9. Г. П. Михайлов, М. П. Эйдельмант, Исследования диэлектрических потерь простых полиэфиров, «Высокомолекул. соединения», 1960, 2, № 10.
10. Г. Л. Берестнева, П. В. Козлов, Влияние растяжки на структуру и свойства пленок из полиэтилентерефталата, «Высокомолекул. соединения», 1960, № 12.
11. В. А. Каргин и др., Исследования в области поликарбонатов, «Высокомолекул. соединения», 1950, 2, № 6.
12. E. Pfiffner, New electric condensers, Elettrotechnica, 1922, 9, Octob.
13. C. Marqu, A new electric condenser, Bull. des Schweiz. El. Vereins, 1926, 14, Febr.
14. W. Hubmann, Dielektrische Messungen an einem Cellon-Kondensator bei mittleren Frequenzen an Niederspannung, Arch. für Elektrotechn., 1928, 20, № 4.
15. F. K. Schoenfeld, A. W. Browne, S. L. Brous, Recent developments with Koroseal, Ind. & Eng. Chemistry, 1939, 31, № 8.
16. Lectrofilm—new dielectric film for capacitors, General Electric Review, 1943, 46, № 12.
17. W. M. Shine, Polyvinyl carbazol resin, Modern Plastics, 1947, Sept.
18. Plastic film oil filled capacitors, Electronics, 1948, June.
19. W. Busse, Polyvinylcarbazol resin as a dielectric material, Ind. & Eng. Chemistry, 1948, 40, № 12.
20. W. Reddish, The dielectric properties of polyethylene terephthalate (terylene), Trans. Farad. Soc., 1950, 46, № 330.
21. M. C. Wooley, G. T. Kohman, W. T. MacMahon, Polyethylene terephthalate (mylar) as a capacitor dielectric, Electrical Engineering, 1952, 71, № 8.
22. H. Hofmeier, Zur Entwicklung der Elektroisierfolie auf Basis von Cellulose-estern, ETZ, 1952, № 20.
23. P. Jolivet, Les nouveaux isolantes électriques, Revue Générale de l'Electricité, 1953, 62, № 6.
24. Mylar capacitors, Proceed. IRE, 1953, 41, № 8, 4A.

25. M. C. Wooley, G. T. Kohman, W. T. Mac Mahon, Polyethylene terephthalate—its use as a capacitor dielectric, AIEE Trans., 1953, 72, p. 1.
26. F. Rocket, Component design trends—fixed capacitors undergo miniaturisation, Electronics, 1954, 27, № 7.
27. L. Whiteman, P. Doigan, Calculation of life characteristics of insulation (polyethylene terephthalate), Electrical Engineering, 1954, 73, № 6.
28. G. Mystic, Plastics as capacitor dielectrics, Cellulose acetate, Plastic Technology, 1955, April.
29. G. Mystic, Plastics as capacitor dielectrics. Mylar, Plastic Technology, 1955, July.
30. J. A. Ruby, Mylar film as a capacitor dielectric, Tele-Techn., 1955, 14, № 4.
31. Mylar polyester film, Rubber and Plastic Age, 1955, 36, № 11.
32. J. A. Jupa, Kel-F plastic for wire and cable industry, Wire and wire-products, 1955, 30, № 7.
33. G. Anders, Eine neue Isolierfolie (Hosaphan), Elektrotechnik, 1956, 38, № 1.
34. G. Mystic, Temperature compensating capacitors, Electrical Manufacturing, 1956, Febr.
35. A. Strojnik, Polivinil jako dielektrik za visokonaponske Kondenzatore, Elektrotechn. Vesn., 1957, 11, № 7—8 (Югослав.).
36. F. W. Graham, D. F. Schmidt, The insulation resistance of capacitors after long time of electrification, IRE Trans. on Component Parts, 1957, CP-4, № 1.
37. G. J. Levenbach, Accelerated life test of capacitors, IRE Trans. on Reliability and Quality Control, 1957, PG, RQC, 10—9—21, June.
38. Nouveaux condensateurs au mylar, Electronique Industr., 1958, № 19.
39. Radio component show, Wireless World, 1959, May.
40. H. Hofmeier, Polykarbonate in der Elektroindustrie, ETZ—B, 1959.
41. Elektroisoliereigenschaften der Polykarbonate, El. Rundschau, 1959, 13, № 9.
42. E. Pasquariello, I policarbonati-poliesteri lineari del l'acido carbonica, NRN (Note, recensione, notizie), 1959, 8, № 5.
43. E. Gwinner, Polyterephthalsäureester-Folie in der Elektrotechnik, ETZ—B, 1959, 11, № 10.
44. Condensateurs polyester, Pièce détachée, 1960, № 19.
45. D. A. MacLean, H. G. Wehe, B. T. Dante, Polycarbonates as capacitor dielectric, IRE Trans. on Component Parts, 1961, CP-8, № 2.

Д. Тонкопленочные конденсаторы

1. Д. А. Федоров, Конденсаторы из ацетилцеллюлозы, «Электричество», 1933, № 2.
2. В. Т. Ренне, Ф. И. Абрамович, Применение ацетилцеллюлозы в качестве диэлектрика в конденсаторах, Труды 3-й Всесоюз. конф. по электроизол. материалам, 1934, том 3.
3. В. Т. Ренне, Новый тип малогабаритного конденсатора — металлолаковый, «Электричество», 1960, № 4, 77—80.
4. D. A. MacLean, H. G. Wehe, Miniature laquerfilm capacitors, Proceed. IRE, 1954, 42, № 12.
5. Laquerfilm capacitors, Wireless World, 1955, 61, № 2.
6. H. G. Wehe, Making metallized laquerfilm capacitors, Electronics, 1956, 29, № 8.
7. H. Sträb, Selbstheilende Kondensatoren, VDE-Fachberichte, 1956, 29, № 6.
8. Der ML-Kondensator — ein weiteres Bauteil für elektronische Geräte, Elektronik, 1959, 8, № 4.

9. E. Schiessel, Der ML-Kondensator, Bull. de l'Ass. Suisse des Electr., 1959, 50, № 14.

10. C. Della Giovanna, Nuovi Condensatori per apparecchiature elettroniche, L'Elettrotecnica, 1959, XLVI, № 8 bis.

11. H. G. Wehe, J. K. Werner, A miniature laquerfilm capacitor, Bell, Laborat. Record, 1960, 38, № 1.

12. Kondensatory ML, Sdélovaci Technika, 1960, № 7 (RCCP).

13. S. Grand, A. Krauss, High quality ultra thin film capacitors, Proceed., 1960, Electronic Compon. Conference, 10—12. 05. 60., Washington.

14. D. A. MacLean, Miniaturization of capacitors in the United States, Intern. Conference on Components and materials used in Electronic Engineering, IEE, 12—16. 06, 1961, London, Programme.

15. D. S. Girling, E. E. Smith, The coated foil capacitors, Int. Conf. on Comp. and mat. used in El. Engng, IEE, 12—16.06, 1951, London, Programme.

Ренне Владимир Тихонович
ПЛЁНОЧНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ
С ОРГАНИЧЕСКИМ СИНТЕТИЧЕСКИМ
ДИЭЛЕКТРИКОМ

М.-Л., Госэнергоиздат, 1963, 203 стр.,
с рис. 621.319.4

Редактор *Д. М. Казарновский*
Технический редактор *Е. М. Соболева*

Сдано в производство 16.XI.1962 г.

Подписано к печати 19.3.63 г.

М23260. Печ. л. 12,75. Уч.-изд. л. 14.

Бум. л. 6,38. Формат 60 × 90^{1/16}.

Тираж 7000. Заказ 390. Цена 85 коп.

2-я типография Военного издательства
Министерства обороны СССР
Ленинград, Д-65, Дворцовая пл., 10